



RIETI Discussion Paper Series 06-J-043

# 半導体生産システムの競争力弱化要因を探る： メタ摺り合わせ力の視点から

中馬 宏之  
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所  
<http://www.rieti.go.jp/jp/>

# 半導体生産システムの競争力弱化要因を探る： メタ摺り合わせ力の視点から

中馬 宏之

一橋大学イノベーション研究センター教授  
経済産業研究所ファカルティフェロー

2006年5月

## 要 旨

我が国半導体産業は、1990年代後半以降、急速に競争力が低下した。本論では、その構造的な要因を、特に生産システムに焦点を当てて探る。その際に注目する要因は、半導体産業自身が生み出したIT技術の“自己増殖”的進化によってもたらされたテクノロジーやマーケットの急速な複雑性増大現象である。このような複雑性の増大は、専門的な知識・ノウハウ、ならびにそれらを効果的に結びつける統合的（＝摺り合わせ的）な知識・ノウハウを累積的かつ速やかに生み出す仕組みを要請する。ところが、我が国の半導体生産システムは、未だにそのような仕組みを十分に創り出せていない。本論では、その要因を明らかにし、解決のためのヒントを模索したい。なお、本論では分析対象を半導体生産システムに限定しているが、問題発生 の 構図は、半導体産業のいたるところにまるでフラクタル図形のように見いだせる。その意味では、「製造中心の時代はすでに終わり、今や設計中心の時代である」といった時代認識は、全体としては正しいものの、大きな危険性をはらんでいる。というのは、我が国半導体産業が、世界の半導体産業をリードするDRAM後のテクノロジー・ドライバーを効果的に生み出せないまま地盤沈下している原因が、「新たに必要となったワンランク上の抽象レベルでの統合的知識・ノウハウを累積的に蓄積するスピードの律速」という生産システムの弱化要因と本質的に同一である可能性が高いからである。

RIETIディスカッション・ペーパーは、専門論文の形式でまとめられた研究成果を公開し、活発な議論を喚起することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

## 1. はじめに

1980年代から90年代初頭にかけて、わが国製造業の高い競争力の源泉として、トヨタ生産方式を典型例とする下記のような生産システムに関する“類型化された事実”が強調された。

- ・ 自らの担当工程のみならず生産工程全体を理解できるような人材育成がなされているので、現場の技能工（オペレータ、保全工）に高度な問題発見・解決能力が備わっている。
- ・ 生産技術部門のみならず設計やR&D部門のエンジニアにも積極的に生産現場を経験させるなど、現地・現物を通じてしか獲得できない情報が有効活用されている。
- ・ 生産現場とエンジニアリング部門、R&D部門、営業（&マーケティング）部門などとの情報共有により、部門間でも迅速なフィードバック・システムが形成されている。

ところが、バブル崩壊後、特に1990年代後半以降において、我が国製造業の中に急速な競争力低下を経験する産業が少なからず出現しはじめている。このような傾向は、中でも、科学的な発見・発明が産業化されるまでの期間が短い半導体やバイオテクノロジー等に代表されるサイエンス型産業において特に顕著である。そして、このような新しい現象に直面し、上記の“類型化された事実”の一般妥当性そのものについて大きな疑念が湧き起こってきている。

なぜ短期間に我が国製造業に関する評価がポジティブなものからネガティブなものへと急速に変わってきたのか？そもそも、このように急変しつつある評価自体には根拠がないのか？あるいは、90年代後半以降に疑念を裏打ちする大きな構造的変化が起こっているのか？もしそうだとしたら、それはどのような構造的変化であるのか？本論の目的は、一般化に際しては細心の注意が必要であることを認識しつつも、最近数カ年の半導体産業に関するフィールド調査結果を手がかりに、これらの問いに試論的に答えることである。<sup>1</sup>

本論では、構造変化要因の重要性を主張する。中でも注目する要因は、誠にアイロニカルであるが、半導体産業自身が生み出した IT 技術の急速な“自己増殖”的進化によってもたらされたテクノロジーやマーケットの急速な複雑性増大現象である。このような複雑性の増大は、専門的な知識・ノウハウ、ならびにそれらを効果的に結びつける統合的（＝摺り合わせ的）な知識・ノウハウの不連続的な深化を不可避にする。ところが、我が国の半導体生産システムは、このような複雑性の不連続的な深化に対し、未だに十分な対応をしきれていない状況にある。よりシリアスな表現が許されるとすると、十分な対応策自体が見いだせないままにあるとも言える。このような状況は、依然として高い競争力を誇る自動車産業や工作機械産業などのエンジニアリング型産業の生産システムでは観察されていない。ただし、半導体の事例は、これらの産業が近い将来に遭遇する“はしり（progenitor）”を暗示する可能性すら秘めている。

上記の事実認識は、我が国製造業、中でもその生産システムの強さを信じて疑わない人々にとって奇異に感じられるかもしれない。というのは、我が国製造業の強さの源泉として強調されてきた点は、まさに関連する部署にまたがる専門的かつ統合的な知識・ノウハウを有した技能工・エンジニアの豊富さそのものであったからである。ところが、半導体生産システムが内包する複雑性が急増するにつれ、このような認識が必ずしも妥当しなくなりつつある。

その大きな理由の一つは、競争力の源泉が、既存の統合型人材が保有する従来型の知識・ノウハウに加えて、それらをメタのレベルで統合したワンランク上の抽象レベルでの知識・ノウハウ（ならびのそれらを累積的に蓄積していくスピード）に大きく依存するようになってきたためである。しかも、前者に比べて、後者の希少性が不連続的に増大してきている。さらに、このようなメタレベルでの統合的な知識・ノウハウは、もはや一人の人間によってスタンド・アロンで保有・活用されるのではなく、複数の人々の間に分有されつつも必要に応じて迅速かつ自律的に結集・活用されなければならない。この種の統合的な知識・ノウハウの幅と深さが、特定個人の情報処理能力限界を次々に超え

はじめているためである。

ワンランク上の抽象レベルでの統合的な知識・ノウハウの構築には、当然のことながら、既存の抽象レベルでの専門・統合的な知識・ノウハウの互換性や再利用性を高め、それらを結集・共有するための新しい仕組みが不可欠となる。そして、そういう仕組みが有効に機能すれば、生産システムの複雑性が不連続的に急増しても、システム内での“部分と全体”の関係がより多くの人々に容易に一目瞭然化可能となるので、“知の結集・共有”の累積的な蓄積をより速やかに行うことができる。さらに、そのような一目瞭然化環境のもとでは、当事者間で価値観(組織のビジョンやミッション)の共有すらも容易になるため、既存の抽象レベルでの知識・ノウハウの有効利用がより広範囲かつ自律的に進んでいく。

ところが、このような効果的な“知の結集・共有”やそのための仕組みづくりは、「言うは易く行うは難し」である。実際、各自の専門・統合的な知識・ノウハウの互換性を向上させるためには、それらの抽象レベルを階層的に整理・統合し、第三者に分かりやすい形で(共通言語)モジュール化しなければならない。<sup>2</sup> さもないと、ワンランク上の抽象レベルでの統合的な知識・ノウハウが、なかなか累積的な形で速やかに蓄積されていかない。ところが、既存知識・ノウハウの再モジュール化<sup>3</sup>は、しばしば、自らの知識・ノウハウの互換性・再利用性向上に貢献する人々自身の希少性を減少させる(と映りがちである)。しかも、そのような傾向は、各自が既存抽象レベルでの知識・ノウハウを豊富に保有していればいるほど顕著となる。そのため、知識・ノウハウの提供者とそれらに(結果的に)フリー・ライドすることになる受益者との間に深刻な利益相反問題が発生してしまう。

我が国の技能工やエンジニアの場合、よく知られているように、彼らに体化されている既存抽象レベルでの知識・ノウハウが幅広く、しかも暗黙知化(属人化)している部分が多い。その点は、例えば、組長や班長といった熟練技能工に委ねられている製造現場での問題発見・解決力の高さに端的に見いだすことができる(小池・中馬・太田(2001))。ところが、このような利点は、知識・ノウハウの互換性・再利用性を高める際に、下記のような事情から、かえって律速因子となりがちである。

- ・ 知識・ノウハウに暗黙知的・属人的な部分が多ければ多いほど、それらの互換性・再利用性を向上させようとする際に、提供者自身に大きな負担を強いる。
- ・ 各自の知識・ノウハウの抽象レベルを整理・統合するためには、より広い範囲での長時間にわたる頻繁なコミュニケーション(含む相互理解を深めるためのミドルウェア<sup>4</sup>的なコミュニケーション・ツール構築)努力が必要となる。
- ・ 当事者間で知識・ノウハウの結集・共有化を図る際に、誰のものをデフォルトにするかで相対的に異なった利益相反の構図が出現するため、結集・共有化プロセスを中立的に実行することが難しい。

本論が注目する点は、我が国特有の初期条件がもたらしている上記のような制約要因のために、半導体生産システム内で新たな統合的知識・ノウハウを累積的かつ速やかに生み出す仕組みに深刻な問題が生じつつある状況である。なお、本論では、表題に合わせて、議論を半導体生産システムに限定する。ただし、上記の意味での“知の結集・共有”を累積的かつ速やかに実施できないことにより競争力が弱体化しつつある構図は、残念ではあるが、半導体メーカー内外の至る所であたかもフラクタル図形のように見いだすことができる。その意味では、我が国半導体産業をリードしている少なからざる人々の「製造中心の時代は既に終わった。今や設計中心の時代である」といった時代認識は、全体として真であるものの、大きな危険性を孕んでいる。というのは、我が国半導体産業が、世界の半導体産業をリードする DRAM 後のテクノロジー・ドライバーを効果的に生み出せないまま地盤沈下している原因が、「新たに必要となったワンランク上の抽象レベルでの統合的知識・ノウハウを累積的に蓄積するスピードの律速」という生産システムの弱化要因と本質的に同

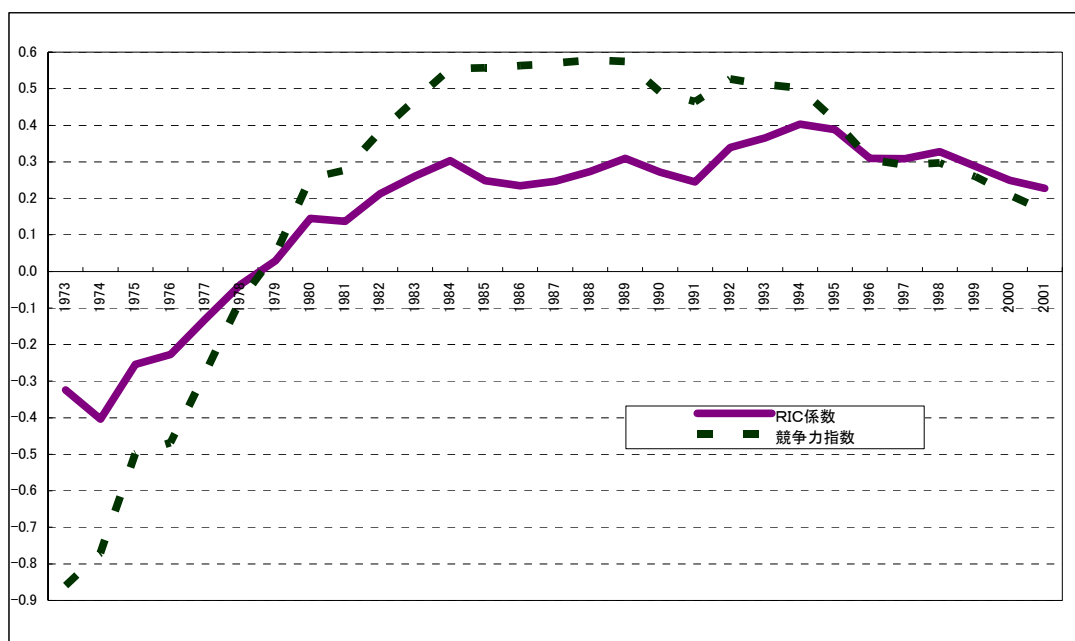
一である可能性が高いからである。

## 2. 半導体生産システムの競争力弱化作因

### 2.1 我が国半導体産業における競争力低下状況

最初に、我が国半導体産業のマクロ動向を時系列的に知るため、RIC (Revealed International Competitiveness) 係数や競争力指数<sup>5</sup>の推移を見ておこう。図1に示されているように、我が国半導体産業の国際競争力は1979年以降プラスに転じ、その後1980年代後半に至るまで急速に増大した。ただし、両指標の伸び率自体は、1985年～1990年頃までにほぼ収束し、1995年以降では競争力指標のみならずRIC指標をも低下しはじめている。RIC係数や競争力指数と同様な傾向は、半導体(ドルベース)出荷高シェアにおいても観察される(図2参照)。事実、同シェアは、1986年に米国を上回り、1988年にはシェア50%超を記録した。ところが、その後急速に低下し始め、早くも1992年に米国に逆転を許し、その後もさらなる低下傾向が続いている。

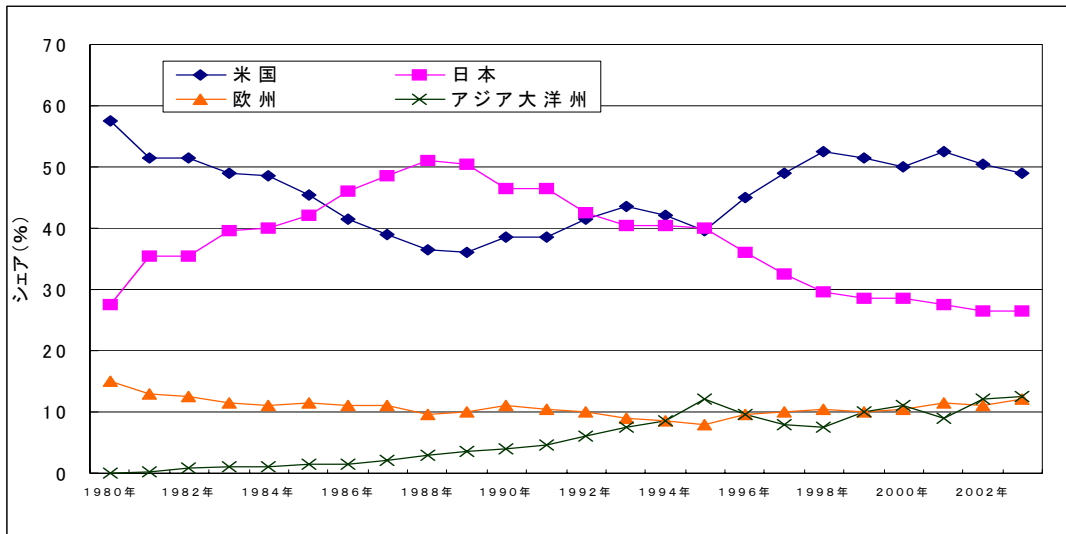
図1 半導体産業の国際競争力指標



出所:機械統計年表、電子工業年鑑

上記のような我が国半導体産業の国際競争力や世界シェア低下傾向には、日米半導体協定(86～95年)下において我が国半導体産業が直面していた大きな事業制約が色濃く反映している。加えて、80年代半ば以降の急激な円高傾向が、我が国半導体産業の競争力の維持・向上に大きなマイナス要因となった。ただし、この時期に生じたテクノロジーとマーケットに関する複雑性の不連続的な増大、特に1990年前後に生じた半導体プロセス技術に関する複雑性の不連続的な増大がもたらしたマイナス効果は、これらの外的要因に勝るとも劣らない負の大きなインパクトをもたらした。

図2 国・地域別半導体メーカーの出荷高シェア推移



出典:IC ガイドブック・2003 (JEITA)

## 2.2 役割の増す複雑性対処策としての事前・事後の柔軟性

生産システムを含む人工物の複雑性が増大すると、その構成要素であるモジュール<sup>6</sup>間に複雑な非線形性が生み出されるため、事前の意味での“不確定性(あるいは予測不可能性)”<sup>7</sup>が急増する。このような不確定性に対処するためには、事前と事後の双方の意味でシステムの柔軟性を高める試みが不可欠となる。そして、そのような試みは、下記の事例に代表されるように、まさに半導体産業発展の急速な発展プロセスの特徴ですらある。

- ・ 半導体デバイスの“生鮮食品化”傾向や多発する開発・設計途上での変更指示に迅速に対処するために、事前・事後双方の視点から半導体デバイスの柔軟性を高めるためのFPGA、PLD、ASSPといった Reconfigurable な半導体デバイスの出現。
- ・ 市場要求の急速な変化、バグ発見速度の律速、(CPU 内の諸機能に対する)複雑・多様な作業要求の増大等々に対応するために Software Programmability を不連続的に高めるべく出現してきたマルチコア (Multiple Processors) 化した SOC (System On Chip) の登場 (Chris Rowen (2004))。

事前の意味で生産システムの柔軟性を高めるためには、生産計画の決定を“将来の頁がめくられる直前まで先延ばしにし、その間に詳細なデータを収集する”仕組みが必要になる。それは、プロ野球の偉大なスラッガー達が、バットのスイングスピードを桁違いに速くすることにより、投じられた球種・球筋を最後の最後まで見極めようとする構図に酷似している (Libet (2005))。また、トヨタ生産方式を特徴づける“プル型生産システム”も、将来の頁をめくる直前の後工程の状況に依存して自工程の将来を予測するという意味で、事前の意味での不確定性増大に対処するためのアルゴリズムとして解釈可能である (Helbing (2003))。<sup>8</sup>

事後の意味で生産システムの柔軟性を高めるためには、計画値と実現値のズレを速やかに認知し修正する仕組みや生産計画そのものを高い頻度で改訂していく試みが必要となる。実際、このような試みは、下記に示されるように、深刻な事前の意味での不確定性急増に直面している様々な分野で導入されつつある。

- ・ ソフトウェア(含む組込ソフト)エンジニアリング分野： 複雑なソフトウェア開発に際し、Waterfall 型開発を特徴とする構造化プログラミングから事後柔軟変更型開発を特徴とする UML(Unified Modeling Language)を利用したオブジェクト指向プログラミングへ移行する試み(D'Souza and Wiils (1999)等)。
- ・ データベース分野： 分類の仕方が事前に固定されがちなリレーショナル・データベースから、分類の仕方を事後的により容易に柔軟変更できる XML データベースに移行する試み(<http://www.pslx.org/>等)

事前・事後の双方の意味での柔軟性を高めるには、“生産状況の見える化”に加えて、“原価の見える化”も欠かせない。より効率的な生産システムの構築には原価システムが、そして、より効率的な原価システムの構築には生産システムが、より有用な情報を提供してくれるからである。実際、この種の生産関数とコスト関数の双対性(Duality)は、経済学の基本命題の一つでもある。しかも、この二つの“見える化”を活かすには、複雑なモジュール間の相互依存状況をモデル(理論)化し、不具合発生原因を素早く追尾できる生産システムが不可欠となる。素早く追尾できれば、モデル自体を探索・修正するための速度が向上し、二つの“見える化”の効果がさらに高まる。また、システムの複雑性が増えるに伴って難しくなるモデルの探索・構築に対応するには、既存の知識やノウハウの互換性や再利用性を向上させ、抽象レベルを1段階上げた新たな知識やノウハウを生み出す必要性が高まる。

### 2.3 複雑性対処策としての Open Object-oriented MES<sup>9</sup>の登場

半導体生産システムにおいて、事前の意味での不確実性を不連続的に増大させるプロセス技術上の一大転換が 1990 年代前半に起きた。この時期は、日本の半導体産業の国際競争力が明確に低下し始めた時期と重なる。その様子は、表1に示される我が国半導体メーカーの原動力であった DRAM(Dynamic Random Access Memory)に関するプロセス技術の時系列的な傾向によっても確認することができる。<sup>10</sup> この表によれば、中心となる製品が1Mb・DRAM から4Mb・DRAM への変化した際に、マスク枚数の大幅な増加が不連続的に生じている。<sup>11</sup> また、同様の変化は、製品開発コスト(第3項)やDRAMを構成するトランジスタ数(第7項)にも顕著に現れている。<sup>12</sup> 例えば、4Mb・DRAM に関して言えば、製品開発コストのほとんど(92%)をプロセス技術開発コストが占めている。4Mb・DRAM では、メモリー・セル構造<sup>13</sup>が、それまでのプレーナ(平面)型からトレンチ・スタックと呼ばれる3次元型の構造に不連続的に変化したためである(伊藤(2000)参照)。単一デバイスに含まれるトランジスタ数も、Mooreの法則<sup>14</sup>に従い、DRAMの世代が代わる毎に約4倍の速度で急増している。<sup>15</sup>

4Mb・DRAM に関連するプロセス技術の不連続的な複雑性の増大は、プロセス技術のみならず半導体工場の大きさやその中に導入される生産システムについても大きな変化をもたらした。その一端は、表1の半導体工場への投資額(第8項、第9項)急増状況からもうかがえる。投資額がこのような急増した大きな原因の1つは、装置ならびに装置間搬送システムの高度化・自動化である。特に、90年代初めに量産が開始された16Mb・DRAM 用などに使用された最先端半導体工場では、図3に示されているように、ウェーハサイズ・対応製造装置の8インチ(200mm)化と自動搬送用ボックスであるオープンカセット(Open Cassette)や SMIF(Standard Mechanical Interface)ボッド<sup>16</sup>を利用した Interbay(工程間) & Intrabay(工程内)双方を自動化した搬送システム(完全自動化システム)が同時に導入された。<sup>17</sup> これらの事情を反映し、必要な半導体工場投資額が、4Mb・DRAMに比べ16Mb・DRAMでは1.5倍に急増している。<sup>18</sup>

表1: プロセス技術の複雑性急増状況(DRAMのケース)

DRAM容量/諸特性	4kb(ビット)	16kb	64kb	256kb	1Mb	4Mb	16Mb
本格量産時期	70年代前半	70年代後半	80年代前半	80年代半ば前後	80年代後半	90年代前半	90年代半ば前後
1. マスク枚数	6枚	10枚	9枚	10枚	15枚	20枚	不明
2. マスク枚数(ICKnowledge)	6枚	7枚	8-10枚	不明	18枚	20-25枚	不明
3. 製品開発コスト	100	300	1109	209	691	2373	不明
3. 1(うち設計コスト)	100 (18)	200 (12)	400 (7)	100 (9)	200 (5)	350 (3)	不明
3. 2(うち製品技術コスト)	100 (36)	200 (24)	800 (26)	100 (17)	200 (11)	350 (5)	不明
3. 3(うちプロセス技術コスト)	100 (46)	420 (64)	1640 (67)	340 (74)	1280 (84)	4800 (92)	不明
4. 外部電源	12V	12V	5V	5V	5V	5V	5V
5. 最小加工寸法(ミクロン)	12-8	5	3	2	1.3	0.8	0.5
6. ウェーハサイズ	3インチ	3インチ	3-4インチ	4-5インチ	5-6インチ	6インチ	8インチ
7. トランジスタ数	4096	16384	65536	262144	1048576	4194304	16777216
8. (平均)工場投資額(億円)	不明	不明	不明	250	450	600	900
9. (平均)工場投資額(百万ドル)	3	8	27	100	125	275	875

出典: 項目1、3はVLSIリサーチ(<http://www.vlsiresearch.com>)

項目2はICKnowledge(<http://www.icknowledge.com/trends/dram.html>)

項目4、5は伊藤(2000)

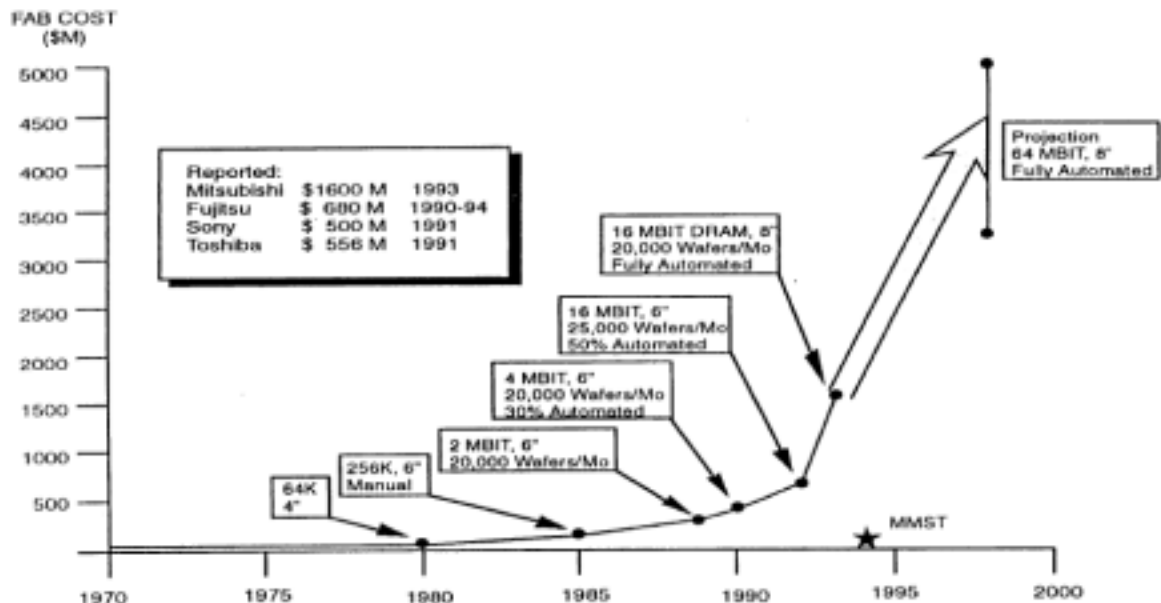
項目6、7はFransilla(2004)

項目8はICガイドブック(JEITA)、項目9はNishi and Doering(2000)

注意: 項目3は、原典は金額表示であるが、ここでは4kbを100とした値に変換してある。

また、項目3. 1~3. 3の()内は、項目3(製品開発コスト)中に占める百分比を示している。

図3: 半導体工場(含む装置)建設費の推移



出典: Lemnis, Z. J. (1993)

上記のような 1990 年前半という潮目の時期において、米国の半導体メーカーは、生産システムの事前・事後双方の意味での柔軟性を飛躍的に高めることのできる“伝家の宝刀”を手に入れた。「オープン・オブジェクト指向型 MES(manufacturing execution system)」を備えた新しい生産システムである。そこには米国流のトヨタ生産システムである「Lean Production System」のアイデアが組み込まれていた。例えば、サイクルタイムを律速させている各種工程間の相互依存関係といった生産システム内における“部分と全体”の関係をより多くの人々に一目瞭然に示すことが可能になった。そのために“知の結集・共有”の速度が向上し、当事者間での価値観の共有化さえ容易にした。この新しい生産システムは、米 Texas Instruments Inc. (TI) を中心に実施した「MMST (Microelectronics Manufacturing Science & Technology)」と呼ぶプロジェクトの成果である。<sup>19</sup>

MMST プロジェクトは、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) や米空軍の財



政支援を得た Texas Instruments が中心となり、SEMATECH との綿密な連繋<sup>20</sup>を取りながら1988年～1993年に実施された米国政府肝いりのプロジェクトである。その大きな目的は、下記に記されているように、「次世代の半導体工場を開発する」ことにあった (Kristoff and Nunn (1995))。

The overall goal of the MMST program was to **develop next generation wafer fabrication technology by improving key areas in the production of wafers, including Cycle Time, cost, and quality.** The MMST Computer Integrated Manufacturing (CIM) system contributed to this goal by providing the following functionality: generation and maintenance of process and product specifications and recipes (**SPEC**), planning of factory operation from order entry through wafer production (**Planner**), scheduling of factory resources to meet the production plan (**Scheduler**), modeling and simulation of factory operation for turnaround- optimization, equipment utilization, etc., tracking of work-in-progress, monitoring of factory performance, machine monitoring, control and diagnosis (**Machine Control**), process monitoring, control and diagnosis (**Process Control**).

MMST プログラムの詳細は IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) の様々な専門誌に譲るが<sup>21</sup>、三本柱として A)枚葉処理<sup>22</sup>システムの開発、B)クラスターツール<sup>23</sup>の開発、C)オープンなオブジェクト指向型 MES (Manufacturing Execution System)の開発が列挙されている。

MES は、SAP3等で有名なERP<sup>24</sup>等の計画系ソフトウェアとは異なり、計画値と実現値とのずれを迅速かつ正確に認識・調整して全体最適化を図るための実行系ソフトウェアである。<sup>25</sup> したがって、MES によって刻々と伝達される生産状況に関する情報解像度(粒度)、一目瞭然度<sup>26</sup>、リアルタイム性が高ければ高いほど事後の意味での柔軟性を向上させることができるし、“将来の頁がめくられる直前”まで工場全体の最適計画を微調整するための余裕が得られる。その結果、より少ない WIP (Work in Process: 仕掛在庫)でより短い TAT (Turn Around Time: ウェーハ投入後デバイスができ上がるまでの時間)や Cycle Time per Layer (マスク一枚当にかかる処理時間)が実現可能となる。<sup>27</sup>

一方、世界の有力半導体メーカーの多くは、少なくとも90年代初頭まで自社開発の専用MESを導入・運用していた。<sup>28</sup> NEC や日立、東芝などの有力日本メーカーのMESも、例外なく(少なくとも1990年代は)自社製であった。<sup>29</sup> 当時の状況に関し、MMSTの成果に基づいたIBM発 Open Object-oriented MESである SuperPoseidon<sup>30</sup>(現 SiView)のアーキテクト(Alan Moser氏、当時IBM、その後SEMATECH)は、1998年の時点から振り返って次のような興味深い指摘をしている。

“I am involved in the semiconductor manufacturing industry. We like to believe that we have the most complex manufacturing requirements of any industry. (Of course, chemical, pharmaceutical, automotive and aerospace all like to claim the same thing!). Within the semiconductor industry, manufacturing execution systems have long been used to track material through the factory from release to final product test and ship. **Traditionally, these MES solutions have been home-grown spaghetti-code monsters that have so evolved over time to be nearly unmaintainable. There are a few suppliers providing MES solutions for semiconductor factories but, due to the prohibitively high costs of integration of "outside" systems with the internal monsters, they have little success in integration projects.**

Because the manufacturing process is so complex, the industry is very dependent upon their MES solutions. **The 1970s technology and code behind these systems can no**

**longer keep up with the technical vitality of the industry and, therefore, new solutions are needed.** However, the demands of the industry are to insure the mistakes of the past are not repeated. The next generation of MES solutions must be better compartmentalized and have substitutable components that can interoperate in a multi-supplier environment.

To this end, SEMATECH (a consortium of U.S. semi-conductor manufacturers) spent several years developing a framework for MES solutions. It is an object-oriented component design utilizing OMG's<sup>31</sup> **CORBA** as the message bus and Cos Services & Facilities where appropriate. **The intention is that any component (including the ORB<sup>32</sup> or services) could be supplied by any supplier and they will work together with little integration development required."**

(<http://www.omg.org/docs/telecom/98-03-11.pdf>より)

なお、この新しい Open Object-oriented MES の有用性を際だてさせるものとして、上記引用の最後の方に記されている“CORBA(=Common Object Request Broker Architecture))”によって実現されたソフトウェアシステム上の特徴(特にオープン性とモジュール性)は注目に値する。CORBAとは、ソフトウェアシステムを構成する自己完結型の共通オブジェクトやコンポーネントならびにアプリケーション・オブジェクトからの要求(Request)を効果的に交通整理するためのプログラム・アーキテクチャを意味している。<sup>33</sup> より具体的には、下記のような特徴を備えている。

“Furthermore it (=Open Object-oriented MES) utilized **CORBA** as the common interface that defines the architecture of an object request broker, **which enables and regulates interoperability between objects and applications across heterogeneous languages and computer boundaries.**” (Lin and Jeng (2006))

このようなCORBAの採用により、度重なる機能追加によってスパゲッティ化・肥大化していた従来型のMESに比べ、新しいMESは、以下のような特徴を持つことができるようになった。<sup>34</sup>

- A) ソフトウェアの核(カーネル)が、オブジェクトやアプリケーションによって頻繁に利用される共通部分に限定され、相当に小規模になった。
- B) 従来型のMESで実現されていた諸機能は、そのようなカーネルに付加される自己完結型のサブシステムとして扱えるようになった。
- C) 新たに必要となる機能が、新たな自己完結型サブシステムとしてカーネルに容易に追加できるようになった。<sup>35</sup>

上記の特徴A)及びB)は、“Precise Abstraction and Traceability”(D’Souza and Wills (1999))を実現することにより、事前のシステム設計や事後のバグ取りなどを容易にするので、事前・事後の意味での柔軟性を高める。また、特徴C)は、事後的に必要と判明した機能を容易に追加できるので、事後的な意味での柔軟性を高める。さらに、A)のような”マイクロカーネル化“<sup>36</sup>も、カーネル自体の事後的な改訂・改良をより容易にする。

従来、各デバイス・装置・ソフトウェアメーカー内に蓄積されていた知識・ノウハウは、“自動化の離れ小島(Islands of Automation)化”(Lin and Jeng (2006))のためにスタンド・アロン状態で保有されていた。ところが、それらは、上記CORBAの導入によって互換性・再利用性を獲得することにより、累積的な蓄積スピードを加速することになった。<sup>37</sup> この点に関し、当時のMESのリーディング・カンパニーであったPromis社の会長・開発者のScott (1996)氏は、下記のような興味深いコメン

トをしている。

Historically, manufacturers have had to choose between using an integrated MES system (often large, costly, monolithic, and insufficiently configurable), or using multiple point solutions (resulting in multiple databases, different user interfaces, different models, and integration nightmares). Today, manufacturers can have both. They can now purchase point solutions that are easily and seamlessly Integratable.

## 2. 4 認知が遅れた TI 流 MES の意義と威力

TI流 Open Object-oriented MES (“ControlWorks”と呼ばれた)は、1993年に表舞台に登場し、各所でその有用性(特にサイクルタイムの一桁短縮)が喧伝されていく。<sup>38</sup> そして、TI で成功裡に実践された MMST プロジェクトの成果は、SEMATECH 経由で CIM Framework 1.0、同 Framework 2.0 として標準化され、<sup>39</sup> “ControlWorks”と同種の設計思想を体化した様々な新しい MES が数々の米国有力半導体メーカーに普及していった。<sup>40</sup>

前述のように ControlWorks の重要な設計思想の 1 つとして、当時米国を席卷していたトヨタ生産方式のアイデアが取り入れられていたことは注目に値する。特に、徹底した WIP&Move<sup>41</sup>管理によってサイクルタイムを大幅に削減するアルゴリズムが模索された。この点に関し、当時の Texas Instruments 製 MES の開発リーダーは、下記のように述べている。

Traditionally, CIM systems have been characterized as monolithic mainframe-based systems and/or inflexible islands of automation with limited interoperability. Today's manufacturing demands fully integrated dynamic systems which **directly support the concepts of lean, flexible and agile manufacturing to high quality standards**. These requirements drove the design of a new CIM system which was developed for the Microelectronics Manufacturing Science and Technology (MMST) program.

このような事実は、我が国の代表的な半導体デバイスメーカーにおいてトヨタ生産方式の導入が叫ばれはじめたのが2000年前後であったことを考えると、一周遅れの感を禁じ得ない。<sup>42</sup>

TI発の Open Object-oriented MES は、米国のみならず韓国の Samsung に代表される DRAM メーカーや、台湾の TSMC に代表されるファンドリーに直ちに普及していった。例えば、韓国 Samsung では、1995年に Fastech(現 Brooks Automation)社の“FactoryWorks”<sup>43</sup>の第一号が(200mm 工場に)導入された。<sup>44</sup> 同じ 1995 年には、ドイツ・ドレスデンにあるシーメンスの200mm 工場に Consilium(現 Applied Materials)社の“Workstream”が導入された。<sup>45</sup> さらに、TSMC は、SMIF ポッドを装備した高度な自動化システムを世界に先駆けて大々的に導入したメーカーとしてよく知られているが、同社最初の200mm 工場用 MES として 1996 年に導入されたのは TI 流に装いを変えた新 Promis であった。<sup>46</sup>

TI 流 MES にビルトインされた新しい半導体生産システム<sup>47</sup>が米欧韓台の半導体メーカーに急速に普及して行くにつれ、これらのメーカーの生産システムの効率性は着実に高まっていった。他方、多くの有力日本メーカーは、Objected-Oriented MES(特にそこに含まれるオブジェクト指向や CORBA 等の斬新なアイデア)には注目しつつも、少なくとも90年代末までは依然として自社製のクローズドな MES と従来型のプッシュ型生産方式<sup>48</sup>に固執し続けた。事実、上記の SEMATECH Framework に準拠した MES が本格的に有力日本メーカーの量産システムに導入されはじめたのは、90年代末期であったし(売賀(1997))、プッシュ型生産からの脱却も 2000 年前後までずれ込んだ。その結果、米欧韓台の半導体メーカーに比べて、以前のような生産システム上の比較優位を維持できなくなっていた。<sup>49</sup>

この点は、90年代に Berkley 大学のグループ (Leachman and Hoges (1996)参照) によって実施されたベンチマークテスト結果にも如実に現れている。<sup>50</sup> このバークレー・ベンチマークテストによれば、表2(主に92年上期～93年下期データを使用)に示されているように、米国半導体メーカーが、当時でも我が国有力半導体メーカーを、マスク1枚当のサイクルタイム(Cycle Time per Layer)のみならず納期遵守率(Delivery On Time)でも相当に上回っていた。また、Leachman and Hoges (1996)は、表2には示されていない項目に関しても日米比較しているが、それによると、“Computerized Dispatching”、“Production Planning based on measured equipment capacity”、“Automated Trouble Messaging and Automated Assistance for Trouble Shooting”などの項目で日本が米国より劣っていたとされている。一方、イールド(良品率: 単位ウェーハ内の良品デバイス比率)、露光装置の利用効率では、我が国半導体メーカーの方が依然として数段勝っていた。このことから判断すると、我が国有力メーカーでは、少なくとも1990年代半ば頃には、イールド(良品率)を上げることが最優先課題とされていた。<sup>51</sup>

上記の生産システムの効率性逆転の様子は、同表に示されている“Cycle Time per Layer”の数値からも類推可能である。具体的には、表2の日米比較結果から判断して、サイクルタイムの Best Score に近いのが米国メーカー、Worst Score に近いのが日本企業と思われる。事実、多くの有力日本メーカーでは、DRAM 事業から撤退する 2000 年前後まで、工程間搬送と工程内搬送の間に設けられたストッカー(バッファ棚)に目一杯ウェーハを詰め込む形での“プッシュ型生産”が一般的であった。そのため、一般的な DRAM 製品の場合、当時は70日～80日の TAT を要していた。<sup>52</sup> そうすると、マスク枚数が25～30枚との現実的な仮定をした場合、マスク層あたり(per Layer) 2.3～3.2日を要していたと推定される。

表2: 90年代前半における日米半導体生産システムのパフォーマンス

TABLE II SUMMARY OF TECHNICAL METRIC SCORES, COMPETITIVE SEMICONDUCTOR MANUFACTURING SURVEY (FIRST 18 MONTHS)				
Metric	Best score	Average score	Worst score	Japan vs. US
Cycle time per layer (days)	1.2	2.6	3.3	-
Line yield per ten layers (%)	98.9	92.8	88.2	++
Murphy defect density - (defects/cm <sup>2</sup> )				Overall: ++
0.7 - 0.9 micron CMOS memory	0.28	0.74	1.52	
0.7 - 0.9 micron CMOS logic	0.28	0.79	1.94	
1.0 - 1.25 micron CMOS logic	0.23	0.47	0.96	
1.3 - 1.5 micron CMOS logic	0.21	0.61	1.15	
5X stepper throughput (5X layers completed per machine-day)	724	382	140	+
Direct labor productivity (wafer layers completed/operator-day)	63.0	29.6	8.0	+
Total labor productivity (wafer layers completed/total staff-day)	37.7	17.6	3.3	++
On-time Delivery (% of line items with 95% of die output on time)	100%	89%	76%	-
Average and worst scores are calculated after discarding the worst data sample for each metric. Legend:				
++ Japanese fabs are almost uniformly superior				
+ Japanese fabs are generally superior				
0 Superior/inferior fabs are not distinguished by region				
- US fabs are generally superior				
--- US fabs are almost uniformly superior				

出典: Leachman and Hoges (1996)

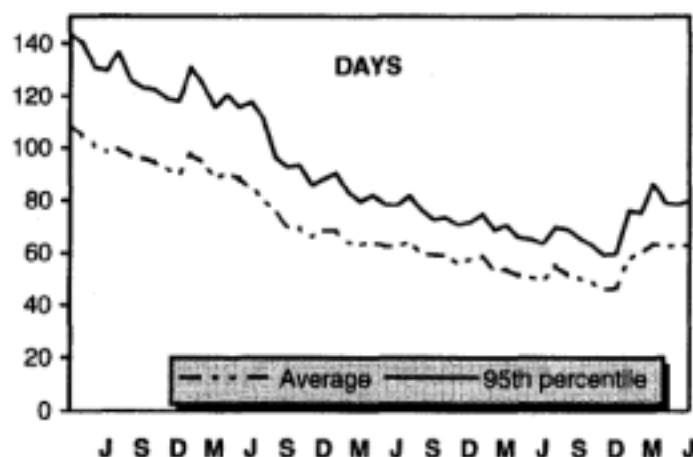
日米における生産システムの競争力が急速に縮まっていく傾向は、Macher その他(1998)や Langlois and Steinmuller (2000)が指摘しているように、既に80年代末期から始まっていた。例えば、Macher その他(1998)は、前述のバークレー調査に直接関わったメンバー達の報告書的な論文であるが、90年代初頭に、サイクルタイムのみならず、(チップ完成後に行われる)プローブテスト段階での良品率(Probe Yield)や直接労働者の労働生産性、欠陥密度(Defect Density)等の指標

でも日米格差が相当に縮小してきていることを示している。米国半導体メーカーのこのような健闘状況は、80年代に米国を席卷しはじめた米国流トヨタ生産システム(Lean Production System)や米国流 TQC 活動である TQM(Total Quality Management)に大いに起因している。実際、インテル、IBM、Texas Instruments、AMD の主だった半導体メーカーのみならず Analog Devices、Harris Computer 等々の中堅半導体メーカーでも、“日本の品質管理システムにならえ”の大運動が展開されていた。<sup>53</sup>

日本メーカーの多くは、上記のような動きに気づいてはいたものの、同時期は静観の構えであった。その様子は、IEEE 主催で90年代前半に行われた半導体生産システムに関する国際コンファレンスでの発表状況からも感じ取ることができる。この点を確認するために <http://ieeexplore.ieee.org/> において“cycle time”及び“Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on”のキーワードで90年代前半に限って検索してみた。そうすると、IBM や Texas Instruments からの発表(含む MMST 関連)は数多いが、日本メーカーからの発表はゼロであった。しかも、下記のような IBM の事例に示されているように、現時点から見ても極めて興味深い発表タイトルに溢れている。<sup>54</sup>

- “Applying just-in-time in a wafer fab: a case study,” Martin-Vega, L.A.; Pippin, M.; Gerdon, E.; Burcham, R.; Feb. 1989.
- “Total cycle time management by operational elements,” Kramer, S.S., May 1989.
- “Emerging paradigms in semiconductor manufacturing,” Castrucci, P.P., May 1990,
- “Work-in-process control in a **continuous-flow manufacturing** line,” Toof, C.S., Weston, D.E., 1991.
- “Manufacturing ownership of work-in-process control,” Toof, C.S., Weston, D.E., 1992.
- “An Approach for Optimizing WIP/Cycle Time/Output in a Semiconductor Fabricator,” G. Leonovich, 1994.

図4: TIにおける“Free Factory”運動の成果



上記のような試みが単なる掛け声だけに終わらなかったことは、Texas Instruments(TI)が1992年に同社の16の世界中の半導体工場を対象に開始された“Free Factory”(包括的な工場生産性向上)運動の状況・成果によっても確認できる。同社の当時の関連活動担当取締役Page (1996)によれば、“Free Factory”運動は1992年に開始され、論文発表時は第三段階にあった。同氏によれば、92年開始から3年後には、上記16工場平均で当初140日であったサイクルタイム(=TAT)

が60日に短縮した(図4参照)。さらに、納期順守率も95%に上昇したという。したがって、文字通り理解すれば、当時の有力日本メーカーに勝るとも劣らないパフォーマンスが1995年時点で実現されていた。

なお、当時TIの世界中にある半導体工場中で最もパフォーマンスが高かったのは(200mm工場を含む)日本TIの3工場であったという。そのことを反映し、92年頃には、日本TIから派遣された製造部隊<sup>55</sup>がTI本体のHouston工場の生産システム改革等に協力したり、韓国(現ハイニックス)やイタリア等の海外工場の立ち上げの中心になったりしていた。<sup>56</sup> その意味では、“Free Factory”運動下、世界中のTI工場にベストプラクティスを普及させるべく創設されたJonah Network<sup>57</sup>を媒介として、日本TIの優れた半導体生産システムが世界中のTI半導体工場に広がっていった可能性が高い。<sup>58</sup>

さらに、Open Objected-Oriented MESの有効利用という点では、IBM・Vermont工場でのサイクルタイム改善活動のレベルの高さが圧巻である。このような活動状況はLeonovich(1994)に詳しく報告されている。同工場は当時としては最先端の200mm工場であり、月産2万5000枚超の能力を持ち、当時量産のピークにあった4MDRAM(40%)に加えてマイクロプロセッサ(40%)やロジック製品(20%)が混流生産されていた。主流のプロセス技術は0.7ミクロン、一部に0.5~0.6ミクロンであった。<sup>59</sup> 当該論文は、伝統的な「ボトルネックとなっている装置の稼働率を可能な限り100%に近づける」という“プッシュ型生産”方式の非効率性を明白にすると共に、ラインを構成する各々のプロセスラインでどのような最適WIP(仕掛在庫)バランスを保持すればサイクルタイムをより短くできるか、そのために各プロセス工程でどのような最適WIPを持てばよいか、最適WIPと実現WIPならびに最適MOVEと実現MOVEの乖離幅をどのような形や頻度でFab Manager等々に見せれば良いか、等々を実際のラインを使って明らかにしている。そして、向こう48時間の最適WIPや最適MOVEの計算にはSEMATECH開発の“SWIM”<sup>60</sup>や市販のシミュレーターが使われており、しかも、上記の乖離情報等々が1時間毎に改訂されていたと記されている。驚くほどの先進性である。

ちなみに、繰り返しになるが、我が国半導体メーカーが、同種のMESに基づいて上記IBM流の先進的な管理を本格的に始めたのは、DRAMビジネスからの撤退が相次いだ2000年前後であった。<sup>61</sup> この点に関し、伊佐治(2001)は、半導体露光装置メーカー・エンジニアの立場から下記のような興味深い指摘をしている。

「アメリカはトヨタのジャストインタイムの思想を実際のラインに適用している。アメリカでは納期遵守が日本よりも重視されている。そこでいかに生産量を落とさずに納期を短縮するかを真剣に検討した結果、トヨタ方式が解であるという結論に達した。基本は物流仕掛かりを最小にすることと、装置の稼働率を最大にすることとの両立であるが、今のところ完成された標準的な物流制御ソフトではなく、メーカー毎に工夫した制御をしている。物流制御はアメリカのみならず台湾、韓国でも盛んで工期短縮が実現されている。日本は物理的な自動化は世界の最先端を走ってきたが、物流制御ではやや遅れた。」(同、16頁)

以上の諸々のイビデンスは、我が国半導体の生産システムが、90年半ば前後から、Open Object-OrientedなMESや米国版トヨタ生産システム、TQMに裏打ちされた米国流トヨタ生産システム(Lean Production System)に劣後し始めていたことを示唆している。

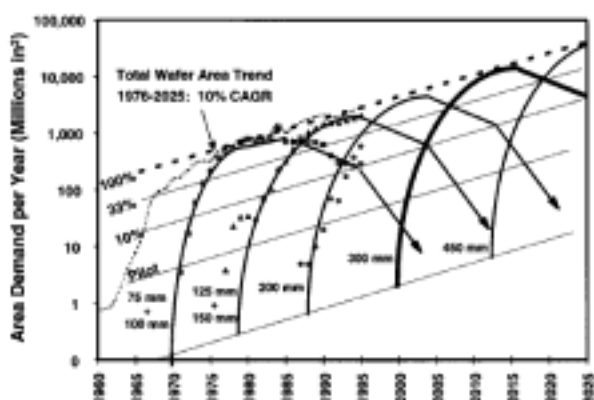
## 2.5 200mm工場投資の遅れがもたらした負の外部効果？

前述のような指摘に対して、「我が国半導体産業の競争力弱化は、(日米半導体協定下の事業制約やバブル崩壊に直面し)90年前後を境に激化した設備投資競争に迅速に対応できなかったためであり、各種の半導体デバイスを生産するためのプロセス技術そのものに関しては、現在でも依然として高い競争力を保持している」、「90年代に入ると、DRAMのような汎用製品の場合、装

置を外部から購入するだけで製造できるようになったから、Samsung などの韓国メーカーに負け始めた」といった根強い反論が存在する。このような反論の妥当性は、事実をどのような抽象レベルで把握するか大きく依存するが、一部は真であり一部は偽であると考えられる。本節では、この点について、触れておきたい。

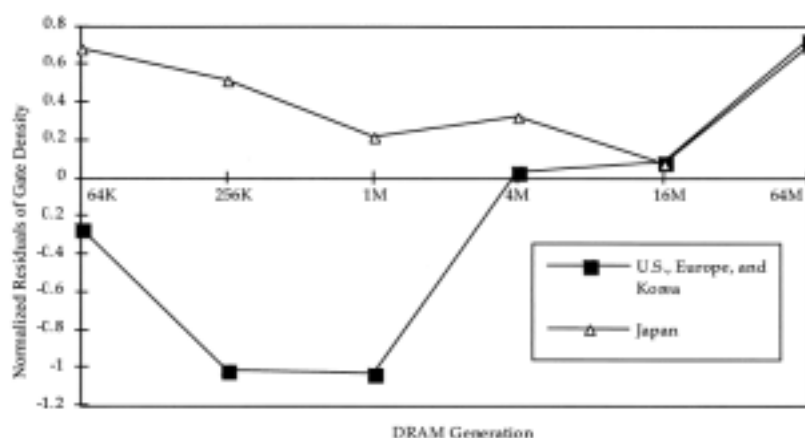
前述したように、1990年前後を境に半導体プロセス技術が不連続的に急増した。特に、(DRAM メーカーにとっては)90年初頭に量産ピークを迎えた4Mb・DRAM や90年代半ばに量産ピークを迎えた16Mb・DRAM を契機として不連続的に高まった。そして、急増したプロセス技術の開発難度に効果的に対処するために、TI 流 MES を備え“完全自動化”された8インチ(200mm)半導体工場の導入が不可避となってきた。このような状況に対応し、韓国 Samsung は、IBM や TI などの米国勢に引き続き、93年にいち早く大規模な16Mb・DRAM(線幅0.5ミクロン)用200mmラインでの量産を開始している。<sup>62</sup> 一方、日本の有力メーカーによる200mm工場への投資は当時なかなか進まず、本格的な200mm化は1995年以降を待たねばならなかった。<sup>63</sup> なお、図5から判断すると、200mm工場に関しては、ピーク時点(2000年)から見た場合、95年時点で既に30%の半導体メーカーが導入済みであることが示されている。

図5： 世界規模における各種半導体工場投資の推移



出典: Doering and Nishi (2001) 及び ICE(1997)

図6： 日米欧韓 DRAM メーカーによる開発競争状況



出典: Iansiti and West(1999)

上記の200mm 化の遅れがもたらした我が国半導体デバイスメーカーへの影響に関しては、

Iansiti and West(1999)が興味深い分析を行っている。図5は、彼らの分析に基づいて描かれたものである。この図は、Electronics Journal 等の業界誌や独自の実地調査によって収集された各社の DRAM プロジェクト毎のデータに基づいている。具体的には、開発に成功したと報道された DRAM に含まれるトランジスタ数(対数変換)を当該“報道年次”に回帰させた推定式に基づいている。このようにして推定された回帰式を使い、プロジェクト毎に実データを代入して残差を求め、それらを日本メーカーと米欧韓メーカーにグループ化してデバイス毎に明示している。回帰式の残差の平均値はゼロであるので、特定容量の DRAM に関しプラスの数値を示すプロジェクトは、マイナスの数値をしめすプロジェクトよりも競争力が高かったと見なされている。残差がプラスの場合、Moore の法則を示す傾向線よりも早めであることを示し、マイナスの場合当該傾向線より遅めであることを示していると解釈できるからである。この図によれば、日本メーカーの米欧韓メーカーに対する DRAM 開発上の比較優位は、4Mb・DRAM で著しく狭まり、16Mb・DRAM で同一となり、64Mb・DRAM では、若干下回り始めている。

Iansiti and West(1999)は、なぜ比較優位構造がこのように変化したかをさらに検討するため、実地の聞き取り調査で得た30弱のサンプルに対して、より詳細なプロジェクト毎の特徴を表す説明変数<sup>64</sup>を使って詳しい回帰分析を行っている。具体的には、被説明変数はそのままにしておき、先の“報告年次”に加えて、“(当該)プロジェクトへのR&D人材投入量(Men/Year)”、“開発に使用された半導体工場のキャパシティ(Wafers/Week)”、“プロセス開発に要した総費用”、“開発品を生産するに要した最小試作日数(Weeks)”、“プロジェクトメンバーの未経験者比率”、“同種プロジェクトに3年以上のR&D経験あるメンバーの有無”、“プロジェクトメンバーの専従度”、“全開発段階従事者に占める同デバイス研究段階従事比率”という変数を追加している。そして、これらの変数の中で、“報告年次”と“開発に使用された半導体工場のキャパシティ(Wafers/Week)”のみが、常に1%の有意水準でプラスに有意であることを明らかにしている。結果は、下記のように総括されている。

“In summary, the preceding analysis shows that variables reflecting experimentation and experience are significantly associated with project performance. **The effect of experimentation capacity (which probes the ability to examine multiple technological options in parallel) is particularly significant.** The results support our hypotheses that integration-type activities are important to high performance in R&D for manufacturing process development.”

上記の指摘は、日本国内で実際に起こっていた状況とかなり符合している。事実、4Mb・DRAM や16Mb・DRAM の時代になると、日立、東芝、NECといった我が国を代表する半導体メーカーにおいて、中央研究所や開発センターで研究・開発された新発明・発見が、必ずしも量産現場で効果的に再現できないものの割合が急速に増えてきていた。言い換えれば、“市場を通じて社会を変革していくための創造的な発見・発明”としての“イノベーション”のスピード低下が顕著になってきていた。また、その結果、R&D→試作→量産のプロセスにおいて開発行為の重複・やり直しが急速に増大していた。<sup>65</sup> さらに、1Mb・DRAM までのプロセス上技術上の問題は、従来半導体メーカー内や系列内装置・材料メーカーとの緊密なコラボレーション(協力・協調)によってかなりな部分まで解決できていた。ところが、90年代に入ると、従来型のコラボレーションではなかなかプロセス技術の開発が進まなくなってきた。半導体メーカーにとって望ましいコラボレーションの範囲が従来の系列の範囲を頻繁に飛び越えるようになってきたためである。<sup>66</sup> 実際、そのような事情により、研究・開発段階で実現された新しいデバイス構造やプロセス技術が、量産用製造装置開発の遅れによって実現できなくなってしまうことも急増した。<sup>67</sup>

なお、我が国有力半導体メーカーがこの時期に200mm化のための設備投資ができなかった要因には、当時の政治情勢を含め一産業としてはいかんともし難い不可抗力的なものが含まれていた。その中の1つは、日米半導体協定下の80年代後半において、我が国有力半導体メーカー



に対して半導体工場の海外移転要請が強まったことである。<sup>68</sup> 事実、同時期、各社による海外直接投資が実施されている。例えば、その中のいくつかの代表例をあげてみると以下ようになる。

1987年 NEC スコットランド工場(イギリス、DRAM)、  
1988年 NEC ローズビル新工場(米国、DRAM)、  
1989年 富士通グresham工場拡張(米国、1MDRAM)、  
1989年 富士通ダーラム工場(イギリス、4MDRAM)、  
1990年 日立ランツフルト工場(ドイツ、4MDRAM)、  
1990年 日立アービン工場(米国、4MDRAM)、  
1990年 三菱電機アーヘン工場(ドイツ、4MDRAM)、  
1990年 三菱電機ダーラム工場(米国、4MDRAM)、  
1991年 松下電子 ビュアラップ工場(米国、4MDRAM)。

なお、上記の工場は、いずれの場合も、150mm(6インチ)工場への投資であった。自国の半導体生産システムを海外に移転する場合、未知の200mm工場ではリスクが大き過ぎるので、成熟していた150mmラインが選ばれたと類推される。<sup>69</sup> ただし、これらの各社による海外直接投資は、1990年代初頭に半導体不況が訪れたこと、日米半導体協定下で依然として米国から様々な圧力がかかっていたこと等々を勘案すると、金融・人材双方の側面から200mm工場への新規投資決定に大きな足枷を課したであろうことが容易に想像できる。

## 2.6 原価発生状況の見える化不足がもたらした視界不良

設備投資の遅れこそ、我が国半導体産業の競争力が生産システムにおいても弱化してきた元凶であるとする通念は、弱化した側の当事者からすれば、自尊心があまり傷つかないので受け入れやすい。ただし、より中立的な立場からは、説得力に欠ける。そもそも、同時期になぜ設備投資が遅れがちとなってしまったのかが十分に明らかでないためである。また、前節で触れたように、我が国半導体メーカーが日米半導体協定下で直面した厳しい事業経営上の制約には同情の余地が多々あるものの、事後的に振り返ってみれば、そのような状況下で選択された投資戦略を含む事業経営戦略に対しては、首を傾げざるを得ない点も少なくない。例えば、やや酷な表現ではあるが、当時の我が国有力半導体メーカーは、米国流トヨタ生産方式導入を明確に意図した Open Objected-Oriented MES の基本的な設計思想やその深遠なインプリケーションをなぜ早期に十分認識できなかったのだろうか？十分に認識できていれば、同MESが特に真価を発揮する200mm工場なしには早晩市場から駆逐される危険性が急増することを十分に予測できたのではないだろうか？<sup>70</sup>

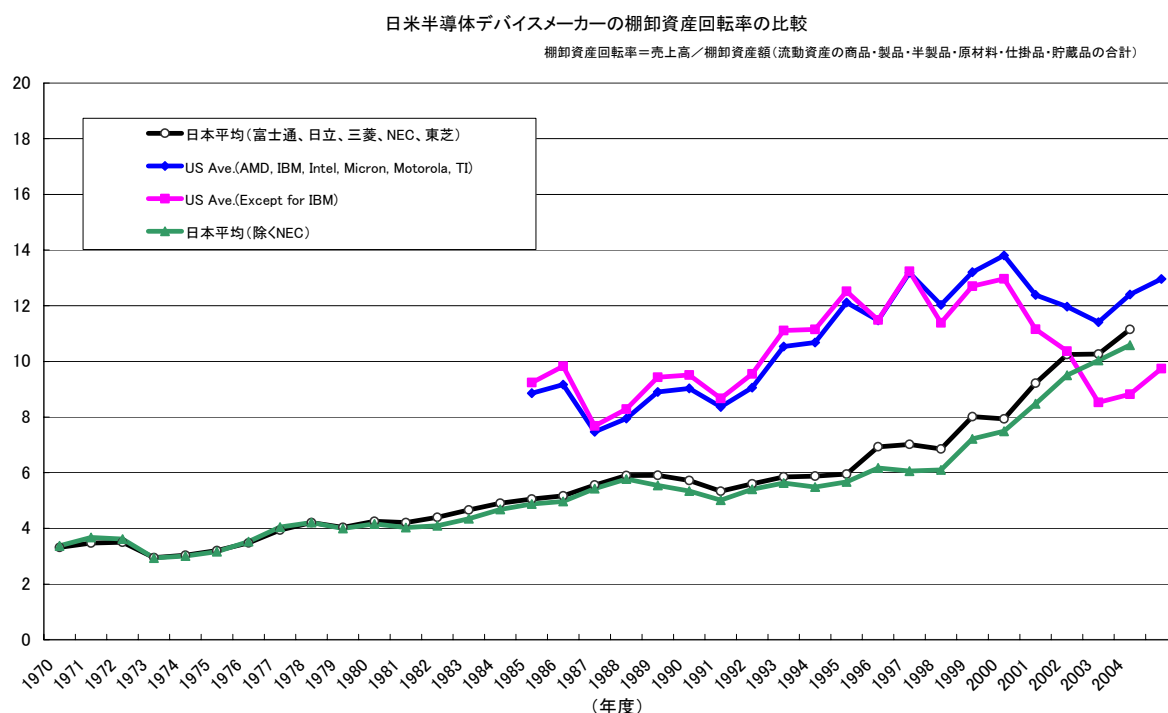
上記のような認識不足を招いた要因として、我が国では、経営層の事業・組織戦略のなさが指摘されることが少なくない。ただし、より詳細に検討してみると、90年以降において米国・韓国・台湾等の半導体メーカーに比べ“原価ならびに原価発生プロセスの可視化”レベルがかなり低くなっていた。このことから浮かび上がってくるのは、通念とは逆の論理、つまり、的確な事業・組織戦略のなさは、的確かつ迅速な原価情報へのアクセスが閉ざされたことに起因していたという論理である。

事実、我が国では、例外はあるものの、<sup>71</sup> 半導体産業のみならず多くの製造業においては、依然として現在においても、旧来の標準全部原価計算方式<sup>72</sup>が導入され続けている。そのため、特に1999年にキャッシュフロー会計が導入される以前は、仕掛在庫や製品(流通)在庫積み増し分が、棚卸資産<sup>73</sup>の増加として認識される傾向が極めて強かった(河田(2004))。そして、まさにそのことが、我が国の半導体メーカーの多くが、DRAM生産に典型的に見られたような所謂“どんぶり勘定”に基づく“プッシュ型生産”を2000年前後まで採用し続けていた大きな理由の1つになってい

た。また、80年代後半以降、R&D部門における創造的な発見・発明が、量産部門である事業部門から十分な懐妊期間を与えられず、成果の一部あるいは全部を内外の同業他社に持って行かれるようなケースも少なからず現れ始めた。<sup>74</sup> 標準全部原価計算方式では、生産量が多ければ多いほど間接費の負担が(一見)軽くなるように会計処理されるため、DRAM等のメモリ事業部門では、強いて短期的な販売量拡大策に走りがちとなる。そうしなければ、当該事業部門を統括する上層部のすげ替え可能性が急増してしまう。

日本メーカーが90年代末期まで棚卸資産をより多く抱えがちであった傾向は、棚卸資産回転率(=売上高/棚卸資産額)に関する日米半導体メーカー間の時系列的な傾向によっても確認できる(図7参照)。この図によれば、日米半導体協定下の時代(1986~1995)において、我が国有力半導体メーカーの棚卸資産回転率はほぼ横這い状態であったが、競争の激化した90年代後半には上昇傾向が顕著になり、特にキャッシュフロー会計が導入された99年度からはさらに在庫削減傾向が加速している。他方、米国有力メーカーの棚卸資産回転率は、統計が利用可能な1980年代半ばから2000年まで着実かつ急速に上昇傾向を示している。ただし、2000年末から2001年の不況下において急速に低下、その後は、極めて数値のよいIBMを除外すると我が国5社平均を下回ってきている。ちなみに、米国においてキャッシュフロー会計が導入されたのは、1989年である。<sup>75</sup>

図7： 日米半導体メーカーの棚卸資産回転率の比較



出典： 各社有価証券報告書ならびに COMPUSTAT

米国では、80年代末期、Johnson and Kaplan (1988) によって指摘された伝統的な標準全部原価計算方式に起因する“Relevance Lost”現象を契機に、ABC (Activity-based Costing: 活動基準原価計算) 方式によって“原価ならびに原価発生プロセスの可視化”レベルを数段高める動きが急速に巻き上がった。このような動きは、アナログ・デバイス社の事例<sup>76</sup>に典型的に示されているように、当時の米国半導体産業におけるTQMや米国流トヨタ生産方式の積極的な導入の動きと緊密に連動していた。事実、トヨタ自動車(1973)は、「品質向上を含めた能率向上の目的は「原価

の低減」にあり、能率を上げること自体が目的となつては全体最適を損なう」と明言している。この点はまったく真であり、米国半導体メーカーが、「原価情報の見える化」に努めて取り組んだことも当然の成り行きだったと言える。<sup>77</sup>

ABCにより“原価情報の見える化”レベルを向上させることの重要性は、SEMATECH によっていち早く認知され、Cost of Ownership (COO)や Overall Equipment Effectiveness (OEE)といった概念が80年末期に声高々に提唱された(ICE(1997))。ただし、我が国半導体メーカーの多くの人々には、これらの概念が日本発の概念であることがあまり知られていない。<sup>78</sup> ところが、OEE という概念こそ、まさにトヨタ生産システムの根幹の一つを成している。それはまた、日本から導入されたアメリカ流 TQC=TQM の中心概念でもある。例えば、トヨタ自動車(1972)は、OEEの重要性を“動く”と“働く”の違いを認識することによって説いている。そして、「トヨタ生産システムでは、本当に工程が進み仕事ができ上がって(付加価値が高まって)行ったときはじめて働いたという」と続けている。

ただし、付加価値を生む作業であるか否かを決定するためには、全体最適の視点が不可欠であるため、全社的な視点からの広範囲にわたる取り組みが必要となる。そして、当時、日本勢の大きな脅威に直面していた米国半導体メーカーの多くは、80年代後半以降、このような取り組みを本格的にはじめた。<sup>79</sup> 当時の状況について、ICE(1997)は以下のように叙述している。<sup>80</sup>

“Many companies use activity-based costing (ABC) to determine the relationship between the cost of devices produced by a fab and each of the components that contribute to this cost. Typically, ABC is implemented by forming the ABC team, developing the ABC model, costing the product line, planning cost reduction efforts, implementing cost reduction, and evaluating results. **Cross-functional teams typically contain employees from all factory departments including finance, purchasing, technology development, process engineering, equipment engineering, production control, and facility groups.** The ABC model demonstrates cost per wafer sensitivity to composite yield, production volume, utilization rate of existing equipment, and the cost of purchasing new equipment.”

## 2.7 視界不良を発生させた構造的な要因

それでは、なぜ我が国有力メーカーは、“プッシュ型生産”が内在的に有する非効率性すらも最近に至るまで改めることができなかったのだろうか？なぜ、事業部門は、必要以上に短期志向になりがちだったのだろうか？なぜ、棚卸資産を積み上げることの大きなコスト性がなかなか認識され得なかったのであろうか？極めて不可解である。ただし、後述のように、標準全部原価計算方式の後進性、総合電機メーカー内におけるセット部門と半導体部門との利益相反問題、80年代後半から約10年続いた DRAM 市場の売り手市場化といった点に着目すると、かなり合点のいく説明が得られる。<sup>81</sup>

我が国半導体メーカーにおける“原価ならびに原価発生プロセスの可視化”レベルは、現状でも、ローム等の例外的な場合をのぞいてかなり低い。実際、我が国の有力半導体メーカーにおいて、全社レベルから工場レベルにまでブレイクダウンしていったときに、各レベルでの原価発生状況を迅速かつ的確に把握できているケースはほぼゼロに近い。あるいは、工場内でラインバランスの乱れによって造り過ぎや造り不足が発生したときに、それらがウェーハ一枚の単価にどの程度のコスト増をもたらすかを説得かつ速やかに計算できるようなメーカーは皆無に近い。工場・工程レベルでの原価シミュレーションについても同様である。もちろん、最新のコンピュータシステムが装備されているので、既存の想定に基づいた計算は極めて容易である。ただし、残念ながら、現場の状況を知り抜いている人々の中に、そのような計算結果の妥当性を信じる人々はそれほど多くない。<sup>82</sup>

以上のように、驚きではあるが、我が国半導体メーカーにおいては、前述の“Relevance Lost”現象が、90年前後から脈々とマイナスの効果をもたらし続けている。しかも、Open Objected-Oriented MES 導入の大幅な遅れによってもたらされた“生産ならびに生産プロセス状況の可視化”レベルの低さが、このような状況にさらに拍車をかけてきた。<sup>83</sup> なお、特筆に値すると思われるが、このような我が国半導体メーカーとは対照的に、韓国 Samsung は、米国半導体メーカーにわずかに遅れる形で、先述の FactoryWorks の導入のみならず、ABC 方式に基づく原価管理や TQM をも90年代初頭にいち早く導入している。<sup>84</sup>

半導体メーカーとしての的確な事業・組織戦略の立案には、“生産ならびに生産状況の見える化”と“原価ならびに原価発生状況の見える化”が必要条件である。これらの“見える化”の必要性は、マーケットやテクノロジーの複雑性が増大すればするほど増大する。もちろん、両者の“見える化”はあくまでも必要条件に過ぎないが、そのような“見える化”が実現されないと、的確な事業・組織戦略など望むべくもない。ところが、前述のように、我が国半導体メーカーでは、両者の“見える化”を共に不十分にしか実行できていなかった。その意味では、少なくとも90年代の我が国半導体メーカーは、自ら苦境を招いてしまったのではないだろうか？それにしても、なぜ世界に冠たる我が国半導体メーカーが、このような自明なロジックになかなか気づけなかったのだろうか？

その原因の1つには、半導体部門が総合電機メーカーの一部門として長く存在してきたという事情が影響していると考えられる。我が国の場合、自動車産業に典型的に見られるように、多くの産業で、最終アセンブラーを頂点とした裾野の広い系列取引関係が成立している。同じことは、総合電機メーカー（特にそのシステム部門）についても当てはまる。実際、総合電機メーカーのシステム部門にとっては、自社の半導体部門が製造する半導体デバイスも、自らの製品を構成する1部品に過ぎない。事実、90年代後半以降、自社製品用の半導体デバイスでも、他社製のデバイスを用いたり、<sup>85</sup> システム部門で設計した半導体デバイスをコストパフォーマンスの良い TSMC 等のシリコン・ファンドリーに製造依頼することが希ではなくなってきた。言い換えれば、一見一枚岩に見える総合電機メーカー内にも、当然といえば当然であるが、EDAツールの革新が可能にしたトップダウン設計のモジュール性によって必然的にもたらされたファブレス・ファンドリー化の波が例外なく押し寄せて来た。

そのため、総合電機メーカーのシステム部門にとっては、ファブレス・メーカーにとってと全く同じように、自社内の半導体部門の間接費であっても、半導体デバイスを部品として製造依頼するという視点に立つかぎり変動費に過ぎなくなってしまう。さらに、システム部門にとっては、開発設計に関わる間接費は存在するものの、自部門の製品原価の大半は変動費であるので、ABC のように多大な労力と経費を費やして間接費を製品原価に配賦するインセンティブはほとんどない。この点は、ファブレス・メーカーが、ファンドリー・メーカーの原価計算方式にほとんど興味を示さないこととまったく変わらない。<sup>86</sup> さらに、総合電機メーカーのシステム部門は、最終ユーザーに最前線で対峙しているため、通常の場合、社内での発言力が極めて強い。このような状況下では、総合電機メーカーには、たとえ間接費が大半を占める半導体部門のような特別な部門を抱えていても、ABC のような全社にまたがった極めて面倒な作業を必要とする原価計算方式を全社的に導入するインセンティブがなかなか湧いてこない。

したがって、この種の部門間にわたる利益相反問題を解決するには、我が国半導体部門が、IDM(Integrated Device Manufacturers)としてではなく独立企業(Pure-Play Firm)として分離・独立することが必要となる。ただし、このような分離・独立は、IDM として保有可能な統合性にも勝るとも劣らない統合性を喚起できるものであることが要請される。さもなければ、分離・独立のコストが便益を上回ってしまうからである。このような意味では、問題の根は想像以上に深い。

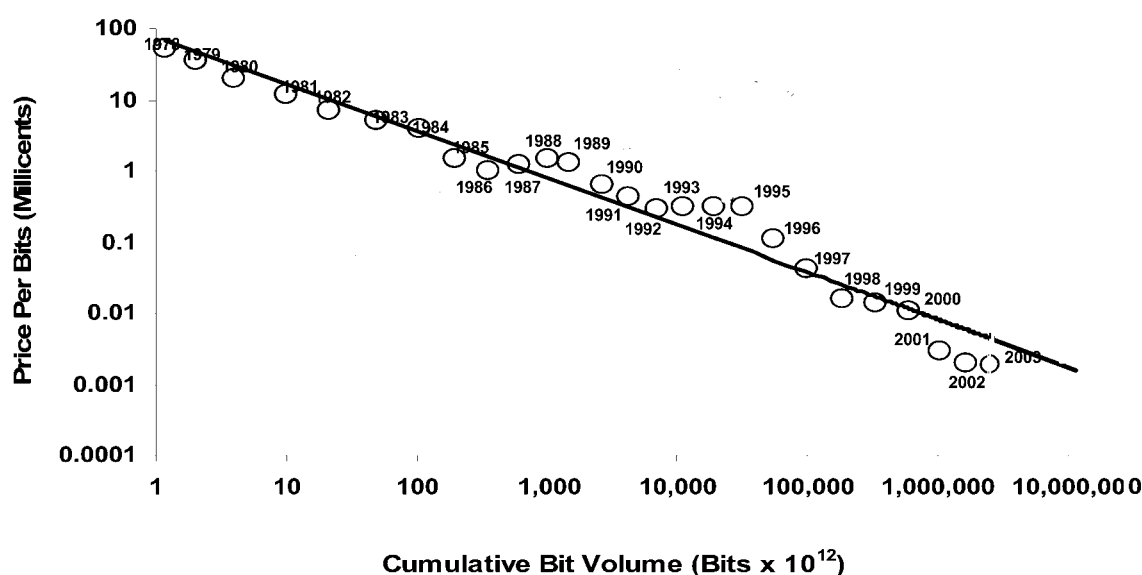
我が国半導体メーカーが先の単純なロジックに気づけなかったもう一つの理由は、90年代における DRAM マーケットの状況に密接に関連している。事実、図8に示されているように、DRAM のビット当たり価格の推移を見ると、日米半導体協定下の1988年から1996年に至るまでの約10年

間、傾向値(図中の直線)と比較するとかなり高めに維持され続けた。この点は、1995年から1996年の DRAM 価格暴落を勘案しても妥当する。確かに、この期間中でもシリコンサイクルによって DRAM 価格は大きく変動した。また、DRAM 価格の変動幅は、90年を境に、DRAM 需要の主体がメインフレームから PC に変わったことによって相当に拡大した(JEITA(2003))。ただし、少なくとも上記の約10年間は、依然として“造ればどうにか採算の合う価格で売れる状況”にあった。このような状況下では、必要だとは分かっているが、ABC のような面倒な原価計算方式を導入するインセンティブをなかなかもてなかったと思われる。しかも、先述のように、我が国においては1999年までは、キャッシュフロー会計が導入されていなかったため、膨大な造り過ぎの機会費用が表面上隠蔽され続けた可能性が高い。この意味では、我が国半導体メーカーは、まさに日米半導体協定によってもたらされた DRAM の高値安定傾向によってコスト削減意欲や生産システム改善意欲が鈍ってしまった。前述のように、米国におけるキャッシュフロー会計導入は、1989年である。

## 2.8 高度な自動化がもたらした技能・技術の補完性弱化

プロセス技術の高度化に伴う半導体生産システムの高度な自動化は、半導体工場内における技能工や装置・プロセス・テストエンジニアの役割に関して大きな変化をもたらした。その一つ大きな要因は、完全自動化システム(含む Open Object-Oriented MES)の導入により、イールド(良品率)に影響を与えるキラー欠陥<sup>87</sup>要因自体が大幅に様変わりしたことである。また、高度な適応制御機能を備えた装置の登場、装置そのもののクラスター化、クラスター化された装置間での複雑なフィードバック・フォワードに基づく APC(Advanced Process Control)の多用は、そのような傾向に拍車をかけた。さらに、設備投資額の巨大化によって装置の有効利用度(広くは、工場の効率的な運用ノウハウ)が競争力を大きく規定するようになってきたことの影響も大きい(詳しくは、VLSI Research(1993)参照)。

図8: DRAM のビット当たり平均価格の推移



出典: McClean Report (2006)及び ICE(1997)

例えば、キラー欠陥に関して、80年代末期における最大発生源は依然として(オペレーター・

保全工等の)人であり、第二の装置要因と併せると71%にも達していた(表3)。ところが、200mm工場が一般的になった 95 年頃では、人・装置関連のキラー欠陥が激減し、プロセス起因のキラー欠陥が群を抜いて1位にランクされるようになった。プロセス起因による欠陥はランダム欠陥とシステムティック欠陥とに分けられるが、現状の最先端工場では半分以上が後者に起因している。<sup>88</sup> このようなキラー欠陥発生要因の不連続的な変化は、下記のような点で、我が国半導体生産システムの比較優位構造に大きなインパクトを与えはじめた。

- A) イールド(良品率)向上に際し考察すべき範囲と深さが急増したため、技能工(オペレーター・保全工等)だけによる5S等の小集団活動の貢献余地が相当に狭まった。
- B) (プロセスの複雑化に伴う)工程数の飛躍的な増大によって、(露光やエッチングといった)主要工程を担う組長主体のエリア別(進捗)管理に加えて、全体最適を図るための工程間にまたがった時系列管理の重要性が増した。
- C) 良品率向上に際し、SPCやAPC<sup>89</sup>の多用、クラスターツールに示される製造装置・プロセスの上位レベルでのモジュール化により、問題解決のための専門・統合的な知識・ノウハウが高度化かつ広範囲化した。

表3: キラー欠陥をもたらす要因の変化

Killer Defect Sources (for a six inch wafer, circa 1988)				
Rank	Source	Defect Count	Defect Density (D/Sq.in.)	Distribution
1	People	15.2	0.54	34%
2	Equipment	12.1	0.43	27%
3	Process	8.0	0.28	18%
4	Liquids	4.9	0.17	11%
5	Air	2.7	0.10	6%
6	Gases	1.8	0.06	4%
TOTAL		44.7	1.58	100%

Source: VLSI RESEARCH INC  
2345-135P

出典: VLSI Research

表4: 半導体製造事業所における小集団活動の非活発化状況

Q22: 10年前と比べて小集団活動は活発になっていますか? 一つだけ選んでください。

	全体		組合	
	組合員	非組合員	半導体産業	非半導体産業
1. 10年前より活発になっている。	18.4	23.9	14.7	20.6
2. 10年前と変わらない。	26.4	22.4	31.4	26.8
3. 10年前ほど活発でない。	30.7	16.4	41.2	29.3
4. 10年前には、この会社の小集団活動には参加していなかった。	15.9	17.9	10.8	17.6
5. 10年前には、この会社には小集団活動はなかった。	3.7	15.7	2	5.8
6. 無回答	4.9	3.7	0	0

上記の特性A)は、従来型の狭い範囲にとどまったままの小集団活動の限界を浮上させること

になった。また、そのことは、我が国の少なからざる半導体生産職場で、各自の最適化範囲の狭隘化、内発的意欲の低下といった深刻な問題を誘発しはじめた。加えて、我が国半導体メーカーの多くは、難度の増したキラー欠陥に起因する製品不具合や装置・プロセス関連トラブルの発見・解決に直面し、それまで少なからざる部分を熟練技能工（オペレーター・保全工）に依存していた我が国特有の方式を改め、エンジニア主体で問題発見・解決を行うシステムに急速にシフトしようとした。そのため、技能工達の内発的意欲のさらなる低下を招いた。加えて、90年代後半から、オペレーションのみならず保全にも“請負工”（日本流の派遣工）を多用するようになり、技能工全体の問題発見・解決力が急減した。<sup>90</sup>

このような状況は、筆者らが実施した電機連合調査（2004年第一四半期実施）にも現れている。事実、現場の正社員の技能工（技能工・保全工など）を対象とした表4に示されているように、半導体製造職場での小集団活動は、その他の製造職場に比べると、10年前に比べてかなり不活発になってきている。また、半導体関連事業所では「現在の小集団活動にできれば参加したくない」と45.6%の人が答えており、他事業所の32%を大きく引き離している。さらに、仕事満足度に関する「会社に（日常）出勤する際の対照的な気持ちとして、おしなべてあなたの正直な気持ちに近いのはどちらですか」という質問に対しては、半導体関連事業所の56.4%が「会社に出勤しなくてすめばいいなと思う」か「そのような思いに近い」と答えており、半導体以外の事業所の42.0%比べるとかなり高くなっている。

特性B)に示されたテクノロジー特性の変化は、生産ラインの運営形態にも大きなインパクトを与えた。従来、特定の工程（あるいはエリア）は、いわゆる“組長ライン”となっていた。“組長ライン”とは、各工程における進捗管理や問題発見・解決が、当該工程を司る組長（あるいは組長間の調整）に委ねられている様子をさす。一般的に、多くの日本の製造業では、今でも技能と技術を結ぶ要としての組長の役割が相当に大きい。ところが、プロセス技術の微細化に伴い生産システムの複雑性が増大していくと、“組長ライン”方式だけでは全体最適を図れなくなった。<sup>91</sup>そして、“組長ライン”の限界を軽減するためには、全工程の流れを時間軸にそって5等分あるいは10等分し、各々の時間セグメントでの連繋状況を常に意識した時系列管理と前述のエリア管理とを同時に行うことが不可欠になった。

ただし、時系列管理は、工程間の連繋調整に際してトップダウン型の色彩を帯びるので、必ずしもボトムアップ型の“組長ライン”方式に馴染まない。そのため、製造現場において、時系列管理を司るスーパーバイザー的な人々（エンジニアあるいは熟練技能工）と各エリアの組長との利益相反問題を効果的に解決するための仕組みが必要となってきた。そのような仕組みづくりには、前述の高い情報解像度を誇るOpen Object-Oriented MESに基づいた“見える化”が重要な役割を果たす。ただし、後述するように、我が国半導体メーカーは、一部の例外的な場合を除き、このようなMESの威力を十分かつ速やかに活用できなかった。

特性C)における製造装置・プロセスの上位レベルでのモジュール化の急速な進展は、半導体デバイスメーカーの抱える技能工（オペレーター・保全工）のみならず装置・プロセス・テストのエンジニアにとっても、急速な装置・プロセス・材料に関する知識・ノウハウのブラックボックス化をもたらした。そのため、彼らの装置・材料メーカーへの依存度が急速に高まった。その結果、彼らにとって不可欠な新たな抽象レベルでの統合的な知識・ノウハウを迅速に蓄積する際に、自社内における技能工・エンジニア間のみならず、彼らと装置・材料メーカー・エンジニアとの間でも情報交換・共有を広範囲で行うための新たな仕組みが必要となってきた。ところが、“生産状況の見える化”不足も影響して、自社保有のプロセス技術を十分にモジュール化することがなかなかできなかった。そのため、自社内に保有すべきコア・プロセスと他社に開示可能な周辺プロセスとが十分に識別できず、そのような情報交換・共有がなかなか進まなかった。

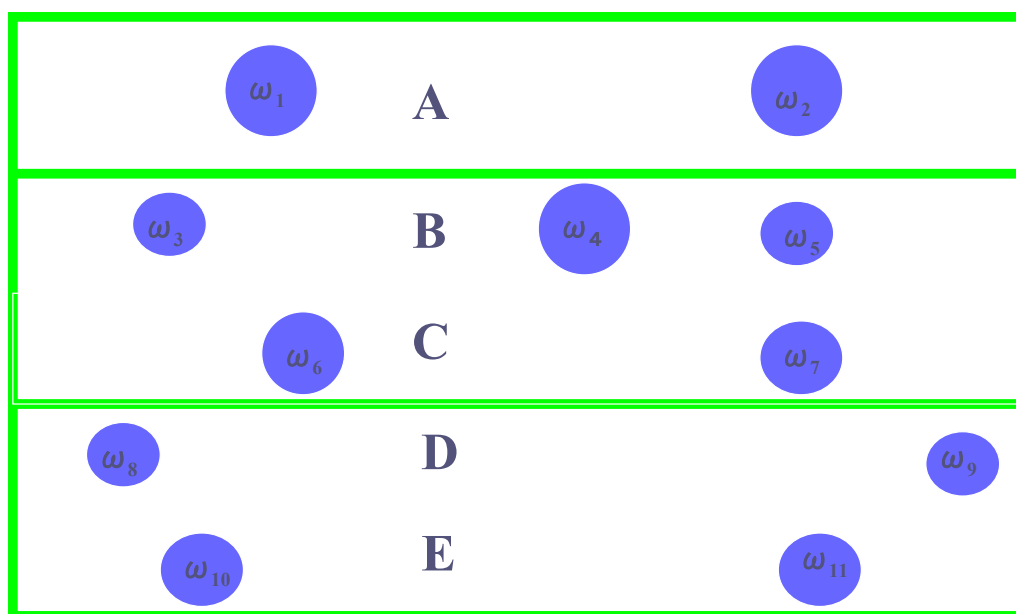


### 3. “メタ摺り合わせ力”を高める新たな試み：広島エルピーダの事例から

半導体生産システムにおける高度の自動化は、アイロニカルであるが、生産システムそのものと技能工やエンジニアの労働意欲や自己実現意欲との相互干渉を顕在化させる。そのような生産システムでは、人々の計算や記憶活動だけではなく、問題解決や法則発見といった高次の活動をもコンピュータによって補完されるためである。<sup>92</sup> しかも、Moore法則にそった急速なプロセス技術の発展が、生産プロセス間の相互依存性を広範囲にわたって急拡大させてきた。そのため、わずかな局所的な攪乱でもシステム全体に大きな影響をもたらす“バタフライ効果”が発生しがちになってきている。<sup>93</sup> 技能工やエンジニアの労働意欲のわずかな低下すらも、生産システム上の効率性を大きく左右することとなってきたのはそのためである。

前述のように、我が国半導体メーカーは、このような傾向を十分に認知できず、1990 年半ば前後を境にして、それまで熟練技能工に少なからず依存していた方式から、もっぱらエンジニア主導で問題発見・解決をする生産方式に急速にシフトした。ところが、問題発見・解決をエンジニアに全面的に委ねる生産システムへの移行は、思わぬ副作用をもたらした。オペレーター・保全工の守備範囲の狭隘化や内発的意欲の低下といった深刻な問題を引き起こしはじめたのである。その結果、我が国半導体メーカーの強みの一つであった熟練技能工・エンジニア間で各々が保有する幅広く深い知識・ノウハウを自律的に交換・共有する仕組みが弱化し、海外半導体メーカーに対する比較優位要因の一つを十分に発揮できなくなってきた。ただし、我が国半導体メーカーの中にも、一般的ではないが、優れた組織経営に基づいて技能・技術の補完性を高めて高いパフォーマンスを示しているところが存在している。本節では、そのような好事例の一つとして、広島エルピーダでのユニークな生産システム改革の試みを紹介してみたい。

図9： 生産状況の一目瞭然性がもたらす便益：“共有知識”の解像度増大効果



同社の生産システムに対する筆者の聞き取り調査によれば、生産システム改革の中で大きな役割を果たしているのは、高度な MES がもたらす生産状況の一目瞭然化である。この種の一目瞭然化は、優れた組織経営の下では、技能工・エンジニア間に以前では考えられなかった程の幅と深さで“相互認知環境”<sup>94</sup>を生み出すため、関係当事者間のコミュニケーション効率が飛躍的に高まる。特に、同社では、“WIP Status Report”という生産計画全体の進捗状況とそこにおける自工程の位置づけ等々が一目瞭然化された(A4で2枚程度の)資料が、一種の“バイブル”として活用さ



れ、より解像度の高い“相互認知環境”を生み出している。この“WIP Status Report”は、一日の中で頻繁に改訂されていくものであるが、管理職のみならず技能工・エンジニア・請負工によって、共通に、しかも四六時中参照されている。したがって、まさに“バイブル”と呼ぶに相応しいものである。もちろん、この“バイブル”を基点とし、それを包摂するより抽象レベルの高い資料や、特定箇所の状況を具体的に示すより抽象レベルの低い資料も多々準備されている。ただし、それらの資料は、主に“バイブル”上の異変や異常の原因をさらに深く追求するために利用されている。なお、同業他社においても、同社と同等かそれ以上の解像度で半導体工場内における“部分と全体”とを示すことのできる生産システムを保持しているところは少なくない。ただし、“WIP Status Report”のような特定の資料を“バイブル”と定め、その“バイブル”を基点にして関係当事者間の“相互認知環境”の幅と深さを意図的に拡大しようとする試みは希である。

上記のような“バイブル”化された“WIP Status Report”による一目瞭然化の工夫が、“相互認知環境”を効果的に創出することによって人々の知識・ノウハウの互換性・再利用性を高めるロジックは、図9に基づいてある程度まで説明可能である。図の長方形の中に示されている  $\omega_1$  から  $\omega_{11}$  は、ある環境下で起こりうるすべての事象だとして。そして、これらの事象のどれが現実起こったのかは、技能者と技術者の二つのグループによって異なった形で認知されるとする。具体的には、技能者グループは  $\{A, (B,C,D,E)\}$  という“知識パーティション”で、そして、技術者グループは  $\{(A,B,C,D), E\}$  という“知識パーティション”でしか発生した事象を認知できないとする。<sup>95</sup> ここで、技能・技術者の“知識パーティション”を示す  $\{\}$  の中の  $(B,C,D,E)$  あるいは  $(A,B,C,D)$  は、実際に特定の事象  $\omega_i$  ( $i=1,2,\dots,11$ ) が発生した際に、各々  $()$  内のものを区別をすることができないということの意味している。したがって、ある事象  $\omega_i$  が発生したときに、技能者グループは  $A$  か  $(B,C,D,E)$  の区別しかできないし、技術者グループは  $(A,B,C,D)$  か  $E$  の区別しかできない。このような“知識パーティション”構造を前提とした場合、技能者と技術者の“共有知識 (Common Knowledge)”<sup>96</sup> = 両者に共通の“知識パーティション”は、すべての事象の集合（つまり図中の長方形全体）となり、かなり大まかなものである。

上記のような初期状態から出発し、その後“WIP Status Report”等の導入による一目瞭然化の試みがなされたとする。そして、そのことによって、より解像度の高い“相互認知環境”が利用可能となり、技能者も技術者も共に  $C = \{\omega_6, \omega_7\}$  を他の事象から識別して認知できるようになったとする。つまり、“相互認知環境”の変化により、技能者・技術者グループの“知識パーティション”の解像度が増大し、各々  $\{A,B,C, (D,E)\}$  と  $\{(A,B), C,D,E\}$  に変化したとする。そうすると、両者の“共有知識”が  $C$  となって、技能工とエンジニア間のコミュニケーション精度が格段に増大する。事実、今や技術者グループにとっては、「AかBが起きた」と認知した場合、「技能者グループに聞けばどちらが実際に起きたかが分かる」ということを知っている。同じことは、技能者グループにも当てはまり、「DかEが起きた」と認知した場合、「技術者グループに聞けば、どちらが実際に起きたかが分かる」ということを知っている。そのため、「互いに自グループが識別できない部分  $((D,E)$  あるいは  $(A,B)$ ) を他グループに教えて貰えれば、より高い解像度  $(\{A,B,C,D,E\})$  で自らが対峙している環境での事象の発生状況を認知できる」ということを知ることになる。このことは、両グループの間で知識やノウハウを共有・結集する動機を一層高める。他方、以前の“知識パーティション”のままでは、この種の情報交換を行っても  $(B,C,D)$  を識別する手がかりを得ることはできない。

広島エルピーダの生産システムにおいては、“WIP Status Report”等の導入による一目瞭然化の便益が関係当事者間にさらに広く深く及ぶように、以下のような組織経営上の工夫が実践されている。<sup>97</sup> これらの工夫の中でも特に重要なのは、③と⑥だと考えられる。

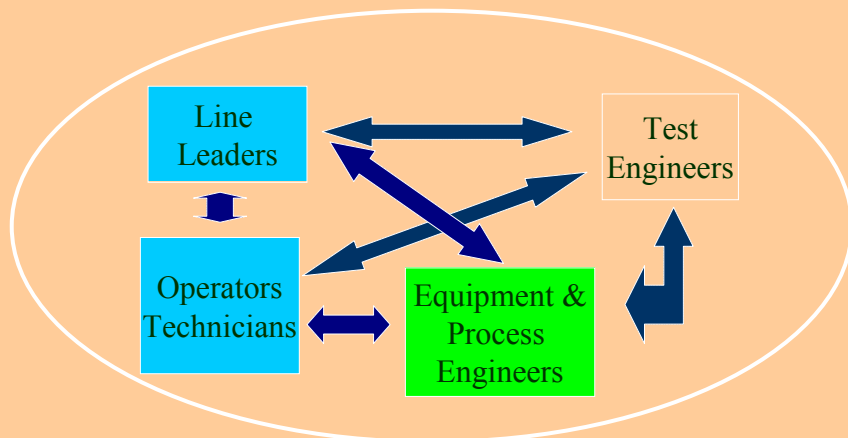
- ① 各種相互依存状況の明確化・客観化のための生産状況の複数レイヤーにわたる“一目瞭然化”
- ② 必要条件としての“理想的生産システム像”の提示（その際“一目瞭然化”指標は、乖離

認知指標として機能)

- ③ 一目瞭然化”情報の共有による各自保有の専門・統合知識の互換性向上&共有・ネットワーク化
- ④ その結果としての各自の内発的な学習意欲・自己実現意欲・全体最適化意欲の喚起
- ⑤ 機会均等性の下での各種学習機会提供による(抽象度が)ワンランク上の専門・統合的知識の継続的かつ自律的な強化
- ⑥ (組織経営努力による)個々人の自己実現意欲と組織ミッション・ビジョンとの同一化推進(特徴的な朝会、Monthly Meeting など)

実際、広島エルピーダの“一目瞭然化された半導体生産システム”は、図10によって特徴づけることができる。この図には、技能工 (Line Leaders、Operators、Technicians) とエンジニア (Equipment & Process Engineers、Test Engineers) との間に情報の流れる方向 (矢印で表示)、情報量 (矢印の太さ) や情報の種類 (実線か破線) が示されている。例えば、両端に矢印が付いていれば情報が双方向に流れるが、一方にしか付いていなければ情報は矢印方向にしか流れない。また、矢印の太さが太ければ太いほど大きな情報が流れる。さらに、実線か破線かは、流れる情報が自発的か非自発的かを意味する。

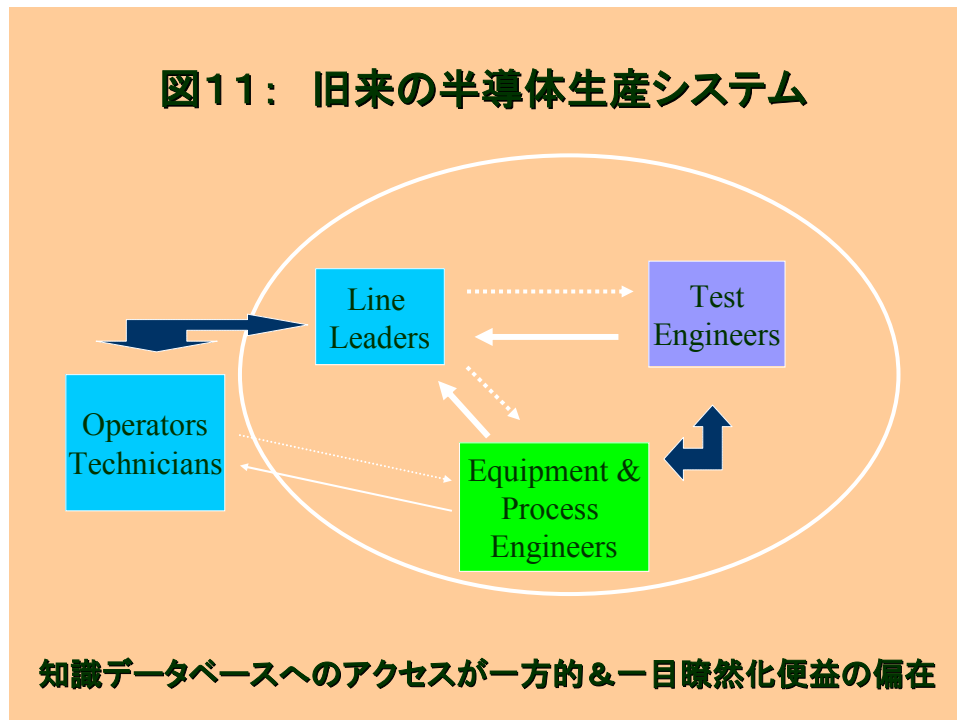
**図10： 一目瞭然化された半導体生産システム**



**知識データベースの共有財産化、透明化、双方向アクセス確保、相互可視化&結果としての関係平等化と内発的動機の重視**

広島エルピーダの半導体生産システムでは、高度な MES によって可能となったデータ粒度 (data granularity) のより細かい知識 (情報) データベースが、(技能者・エンジニアにとって) 共有財産化・透明化されているため、技能者・エンジニアいずれの間でも多くの情報が双方向に自発的に流れている。その結果、知識データベースやその変容プロセスが相互可視化されており、特定の主体 (例えばエンジニア) に情報が偏在しない仕組みとなっている。このような環境下では、上記の④が効果的に実践可能となる。もちろん、この種の良循環が生まれるためには、⑥に例示されるような経営トップ層の確固とした決意と不断の組織経営努力が不可欠である。

**図11： 旧来の半導体生産システム**



他方、前述のように、我が国半導体メーカーにおける生産システムは、図11に示されるような形になってしまっている場合が少なくない。これらのメーカーでは、前述のように、1990 年半ば前後を境にして、それまで熟練技能工に少なからず依存していた方式から、もっぱらエンジニア主導で問題発見・解決をする生産方式に急速に移行したためである。しかも、その際に、MES によってもたらされるデータ粒度のより細かい知識(情報)データベースへのアクセスが、問題解決を一手に担うことになるエンジニアに偏在する傾向が高まった。そのため、技能者グループ内やエンジニアグループ内では情報が多量に双方向に流れるものの、両グループ間では流れる情報量が少なく、しかも、エンジニアから技能者に一方的に流れる傾向が強くなった。また、オペレーター・保全工(Operators, Technicians)と装置・プロセスエンジニア(Equipment & Process Engineers)との間に情報が直接流れることはほとんどなく、前者にとって必要な情報は、エンジニアから組長(Line Leaders)経由で流れることが多くなった。その結果、上記の③～⑤の便益がなかなか生み出されにくくなり、技能と技術の補完性が弱化した。この点に関連する Zuboff(1984) の下記のような指摘は、極めて示唆的である。

“Information technology essentially alters the contours of reality: work becomes more abstract and visibility are increased by an order of magnitude beyond any historical capability. The traditional system of imperative control depended upon restricted hierarchical access to knowledge and is fatally flawed in its ability to adequately exploit the power of “information panopticon.” In contrast, an informed organization is structured to promote the possibility of useful learning among all members and thus presupposes relations of equality.”

広島エルピーダにおける生産システム改革の劇的な効果は、実データによっても確認することができる。その一端は、表5に示される同社300mm工場における生産システムの各種パフォーマンス

指標(第1欄)<sup>98</sup>の時系列的な傾向に顕著に示されている。同社における本格的な改革開始時期は2003年10月であるので、表の第2欄は改革開始直前(2003年9月)の状況を示す基準として、すべての項目を100としてある。第3欄と第4欄は、各々2004年3月と2005年1月の数値である。<sup>99</sup> 空欄は、当時データとして採られていなかったことを意味する。その場合、便宜上、次の2004年3月末の数値を100として基準化されている。なお、同期間中、直接労働者(オペレーター・保全工・請負工)の数は、ほとんど増えていないことに注意されたい。

表5によれば、同期間中に「ウェーハ(月間)生産量(“Wafer Out”)」が約18倍になっているが、「マスク1枚あたりの処理時間(“Cycle Time”)」が2003年9月に比べて約70%減少したことなどを反映し、対応する「ウェーハ(月間)仕掛枚数(“C/R WIP”)」は約6倍しか増えていない。また、このようなウェーハ生産量急増の背景には、「計画より24時間以上遅れたウェーハの(月間)枚数(“Q-Time (≥24Hr Delay)”)や「再露光が必要となったウェーハの(月間)枚数(“Litho Rework”)」、「生産に使えなくなった装置の(月間)台数」の激減が大きく影響していることが見て取れる。その結果、仕掛ウェーハ1枚あたりの Wafer Move 枚数(“T.O.R(Turn of Ratio)”)が約70%向上している。さらに、「実験や品質確認用に使用されたウェーハの(月間)枚数(“Pilot Wafer Usage”)」は、技能工・エンジニアの広範囲にわたる連繋プレイなしにはなかなか減少しないものであるが、その急減スピードは驚くほどである。

表5: 生産システム改革の状況

	Sep-03	Mar-04	Jan-05
<b>Equip. Capacity</b>	<b>100</b>	<b>533.3</b>	<b>1000.0</b>
<b>Wafer Start</b>	<b>100</b>	<b>464.4</b>	<b>726.7</b>
<b>Wafer Out</b>	<b>100</b>	<b>911.1</b>	<b>1777.8</b>
<b>Wafer Move</b>	<b>100</b>	<b>597.3</b>	<b>1028.2</b>
<b>C/R WIP</b>	<b>100</b>	<b>477.6</b>	<b>613.2</b>
<b>Line Yield</b>	<b>100</b>	<b>132.7</b>	<b>134.2</b>
<b>Cycle Tyme</b>	<b>100</b>	<b>91.4</b>	<b>68.9</b>
<b>T.O.R (Wafer Move/WIP)</b>	<b>100</b>	<b>125.0</b>	<b>167.7</b>
<b>Pilot Wafer WIP</b>	-	<b>100</b>	<b>30.3</b>
<b>Pilot WaferUsage</b>	-	<b>100</b>	<b>37.3</b>
<b>Q-Time (≥24Hr Delay Wafer)</b>	<b>100</b>	<b>27.5</b>	<b>11.3</b>
<b>Litho Rework</b>	-	<b>100</b>	<b>52.8</b>
<b>Machine Down</b>	<b>100</b>	<b>60.0</b>	<b>30.0</b>

### 3. むすびにかえて: 生産システム復活のために必要なこと

日本の半導体産業は、現状も依然として高い潜在力を持つが、それらを十分に発揮するには至っていない。ただし、その潜在力は世界を支える半導体産業の一層の発展のために、ぜひとも必要と考えられる。それでは、そのような潜在力の一翼を担う生産システムが目覚ますには、今何が求められているのだろうか。真っ先に言えることは、旧来の標準全部原価計算方式を払拭し、“原価発生状況の見える化”の水準を高めることである。「能率向上の目的は“原価の低減”にあり、能率を上げること自体が目的となつては全体最適を損なう」(トヨタ自動車(1973))。しかも、現実の原価が、真の原価に比べて大きなバイアスを持っていたら、全体最適など望むべくもない。

“生産状況の見える化”を不連続的に高めるためのオープン MES の導入、そのプル型生産への有効適用に関しては、2000 年前後を境に日本メーカーでも急速に進められてきた。ただし、世界の最先端の半導体生産システムにおいては、プロセス技術の複雑化を反映し、オープン MES すらサブシステム化している。そして、半導体メーカーにとっては、コア部分のオープン MES に独自開発品か市販ソフトウェアをプラグインする形で独自の包括的な生産システムを構築できるか否かが勝負どころになってきている。

そのような包括的な生産システムの性能は、増大する事前の不確定性に対処するための事前・事後の意味での柔軟性で決まる。そして、この点で世界をリードする米 Advanced Micro Devices, Inc. (AMD) などの生産システムと比較した場合、日本メーカーは依然として劣っている感がある。<sup>100</sup> この点に関して、国民性としての理論モデルの構築力の弱さを指摘する向きも少なくない。ただし、そのような遅れは、「オープン MES をコアとした包括的な生産システムを保有することを事業経営上どれほど重視するか」の経営判断に大きく起因していると思われる。

最後に、日本の半導体メーカーの強みの一つであった熟練技能工とエンジニアが知識やノウハウを交換・共有するための仕組みがほころび始めていることは由々しい問題である。技能と技術とは、本質的な理解が必要とされる非線形現象に直面した際に、前者は感性、後者は科学を主に使うという意味で全く異なっている。そのため、技術は技能を包含できない。この点は、最先端の半導体システムにも当てはまる。技能・技術の補完性を十分に活用できる日本メーカーが、海外メーカーに対して優位性を発揮できる理由もそこにある。

上記の視点に立って技能と技術とが相互に補完しあえる仕組みが導入されれば、現状のほころびは修復可能である。それは、エルピーダメモリやユー・エム・シー・ジャパン (UMCJ) における生産改革の事例からも分かる。両社に対する筆者の聞き取り調査によれば、そのような仕組みの中で大きな役割を果たしているのは、高度な MES がもたらす生産状況の一目瞭然性である。この種の一目瞭然性は、優れた組織経営の下では、技能工・エンジニア間に、以前では考えられなかった程の幅と深さで“相互認知環境”を生み出す。その結果、技能工とエンジニア間のコミュニケーション効率が格段に増し、知識やノウハウの互換性が向上する。加えて、各自の知識やノウハウを共有・結集して一段階上の抽象レベルの知識やノウハウを生み出そうとする自律的な意志も生まれる。そのような意志がより大きな同一方向のベクトルに結実する時、現状が不連続的に変わっていく。ただし、このような好循環を早期に生み出すためには、エルピーダで実践されているように、個々人の自己実現意欲と組織が掲げるミッションやビジョンを可能な限り近付ける経営トップ層の確固とした決意と不断の組織経営努力が不可欠である。

## 参考文献

- Aragonés, E., I. Gilboa, A. Postlewaite, and D. Schmeidler (2005), “Fact-Free Learning,” *American Economic Review*, Vol. 95, No. 5, December 2005, pp.1354-1368.
- Beaver, R., A. Coleman, D. Draheim, and A. Hoffman (1994), “Architecture and Overview of MMST Machine Control,” *IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING*, VOL. 7, NO. 2, pp. 127-133.
- F. ブッシュマン, H. ローネルト, M. スタル, R. ムニエ, P. ゾンメルラード (2000), 『ソフトウェアアーキテクチャソフトウェア開発のためのパターン体系』, 近代科学社。
- 中馬宏之(2005), 「生産技術移転の可能性と製品アーキテクチャ—日・中・タイ冷蔵庫工場の事例から」, マネジメントトレンド, vol.10, no.1,(通巻 35 号), 59～70頁。
- Baldwin, Carlis Y. and Kim B. Clark (2000), *The Design Rules: The Power of Modularity* Vol. 1, MIT Press.
- Cooper, R., R. S. Kaplan, and L. S. Maisel (1993), *Implementing Activity-Based Cost Management: Moving from Analysis to Action: Implementation Experiences at Eight Companies*, (邦訳名『ABC マネジメント革命—米国企業を再生させたコスト管理手法』, 第3章 アドバンスド・マイクロ・デバイス (Advanced Micro Devices), Institute of Management Accountants(邦訳版は日本経済新聞社、1995年)。
- D. F. D'Souza and A. C. Wills (1998), *Objects, Components, and Frameworks With Uml: The Catalysis Approach* (Addison-Wesley Object Technology Series), Addison-Wesley Publishing.
- Rowen, C. (2004), *Engineering the Complex SOC: Fast, Flexible Design With Configurable Processors*, Prentice-Hall.
- Franssila, S.(2004), “Introduction to Micro Fabrication,” John Wiley & Sons, Ltd.
- 藤村修三(2000), 『半導体立国ふたたび』(日刊工業新聞社)
- Fuller, L. F., (1990), “Implementation of A CIM System for Semiconductor Manufacturing at Rochester Institute of Technology,” *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, pp. 108-111.
- 橋本哲一(2005), 「SiO<sub>2</sub> 膜装置の競争が激化: 東京エレクトロンに海外勢が迫る」, 日経マイクロデバイス, 2005年11月号, 86－87頁。
- Helbing, D. (2003), “Modeling and Optimization of Production Processes: Lessons from Traffic Dynamics,” Santa Fe Institute (SFI) Working Paper, No. 03-10-057 (<http://www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/03-10-057.pdf>)
- Iansiti, M. and J. West (1999), “From physics to function: an empirical study of research and development performance in the semiconductor industry - An innovation process variable,” *The Journal of Product Innovation Management*, Volume 16, Number 4, July 1999, pp. 385-399.
- Integrated Circuit Engineering(ICE) Corporation (1997), *Cost Effective IC Manufacturing 1998-1999*, <http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/CEICM/title.pdf>
- Integrated Circuit Engineering(ICE) Corporation (1996), *PROFILES 1996 A Worldwide Survey of IC Manufacturers and Suppliers* (<http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/PROF96/title.pdf>) ed. by B. McClean.
- 伊佐治弘(2001), 「ウェーハ搬送の自動化の現状: 半導体工場の自動化の概要」, *Break Through* 11月号, No.184, サイベック社, (<http://www.realize-at.jp/items/bt/184.pdf>)
- 伊藤清男(2000), 『超 LSI メモリ』, 培風館。
- JEITA(2003), 『IC ガイドブック —2003 年版— 時代の先端を拓く半導体産業・技術の全

貌』.

- Johnson, von T. H. and R. S. Kaplan (1988), *Relevance Lost: Rise and Fall of Management Accounting* (邦訳名『レレバンス・ロストー管理会計の盛衰』(鳥居宏史訳)), Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts, (日本語版: 白桃書房、1992 年)
- 河田信(2004), 『トヨタシステムと管理会計ー全体最適経営システムの再構築をめざして』, 中央経済社.
- 小池和男・中馬宏之・太田聡一(2001), 『もの造りの技能:自動車産業の職場で』, 東洋経済新報社.
- Kristoff, P. R. and D. P. Nunn (1995), IEEE “The Process Specification System for MMST,” IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, VOL. 8, NO. 3, AUGUST, pp. 262-271.
- Leach, R. and C., Hodges, D. A. (1996), “Benchmarking Semiconductor Manufacturing,” 同上, vol.9, no.2, pp.158-169.
- Lemnis, Z. J. (1993), “Flexible Intelligent Process Equipment,” in International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM), September 20-21.
- Leonovich, G. (1994), “An approach for optimizing WIP/cycle time/output in a semiconductor fabricator,” Proceedings IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium.
- Libet, B.(2005), 下條信輔訳, 『マインド・タイム:脳と意識の時間 (Mind Time:The Temporal Factor in Consciousness)』, 岩波書店, 2005. (Harvard University Press, 2004.)
- Lin, Chang-Pin and M. Jeng (2006), “An Expanded SEMATECH CIM Framework for Heterogeneous Applications Integration,” IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS, VOL. 36, NO. 1, JANUARY, pp. 76-90.
- McCLEAN, B. (2006), *The McClean Report: A Complete Analysis and Forecast of the Integrated Circuit Industry*, IC Insights Annual Report.
- McGehee, J., Hebley, J., and Mahaffey, J. (1994), “The MMST Computer-Integrated Manufacturing System Framework,”IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol.7, no.2, pp.107-116.
- Naguib, H. (1993), “The Implementation of Total Quality Management (TQM) in a Semiconductor Manufacturing Operation,” IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, VOL. 6. NO. 2, pp. 156-162.
- Nishi, Y., and Doering, R. (2000), “Handbook of Semiconductor Manufacturing,” Marcer Dekker Inc.
- 中村実・正田耕一編(2000), 『MES 入門』, 工業調査会
- 日本管理会計学会編(2000), 『管理会計学大辞典』, 中央経済社.
- 西田豊明(2005), 『インタラクションの理解とデザイン』, 岩波書店.
- Page, M. (1996), “The Free Factory: Cutting Cycle Time and Gaining Output,” IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp.146-150, Nov.
- Poppendieck, Marry and Poppendieck, Tom (2003), *Lean Software Development: An Agile Toolkit* (Agile Software Development Series), Addison-Wesley Pub.
- LANGLOIS, R. N.(2000), “Capabilities and Vertical Disintegration in Process Technology, the case of semiconductor fabrication equipment,” in *Resources, Technology and Strategy* ed. by Foss, Nicolai J. and Robertson, Paul L., Routledge, pp. 199-226. (Originally written in 1992)

- LANGLOIS, R. N. and W. E. STEINMUELLER (2000), "STRATEGY AND CIRCUMSTANCE: THE RESPONSE OF AMERICAN FIRMS TO JAPANESE COMPETITION IN SEMICONDUCTORS, 1980-1995," *Strategic Management Journal*, vol. 21, pp. 1163-1173.
- Macher, J.T., D.C. Mowery and D.A. Hodges (1998) "Reversal of Fortune? The Recovery of the U.S. Semiconductor Industry," *California Management Review* 41(1): 107-136. (参考: <http://faculty.msb.edu/jtm4/Papers/CMR.pdf>)
- McGehee, J., J. Hebley, and J. Mahaffey (1994), "The MMST Computer-Integrated Manufacturing System Framework," *IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING*, VOL. 7, NO. 2, pp. 107-116.
- Suh, Num P. (2001), *Axiomatic Design: Advances and Applications* (The Oxford Series on Advanced Manufacturing), Oxford University Press.
- Sadjadi, F., and Baker, T. (2001), "Comprehensive cycle time reduction program at AMD fab25," *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, pp.95-98.
- Samuelson, L. (2004), "Modeling Knowledge in Economic Analysis," *Journal of Economic Literature*, Vol. 42, No.2, pp. 367-403.
- Scott, D. (1996), "Comparative Advantages Through Manufacturing Execution Systems," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, ASMC 96 Proceedings*, pp. 179-184.
- Sperber, D. and Wilson, D. (1999), 内田聖二, 中達俊明, 宋南先, 田中圭子訳, 『関係性理論: 伝達と認知 (第2版)』(Relevance: communication and cognition), 研究社.
- Sullivan, M., S. W. Butler, J. Hirsch, and C. J. Wang (1994), "A Control-to-Target Architecture for Process Control," *IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING*, VOL. 7, NO. 2, pp. 134-148.
- トヨタ自動車(1973), 『原価低減のためのトヨタ生産方式: 基本編』(社内資料).
- トヨタ自動車車両生産技術部・トヨタ自動車九州(1993), 『新しい自動車ラインの開発一人を中心とした自立適応型新組立方式』(社内資料)
- トヨタ自動車グローバル人事部(2001), 『The Toyota Way 2001』(社内資料).
- 売賀賢介(1997), 「半導体工場におけるオープン化」、精密工学会誌、Vol.63, No.5, 629-632 頁。
- United States General Accounting Office (1992), *FEDERAL RESEARCH: SEMKTECH's Technological Progress and Proposed R&D Program*.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1993), *Defense Conversion: Redirecting R&D*, OTA-ITE-552 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office).
- VLSI Research (1993), *VLSI Research's History of the Equipment Industry*, Development of Etching & Cleaning (<https://www.chiphistory.org/documents/etching&cleaning.pdf>) and Development of Other Equipment ([https://www.chiphistory.org/documents/other\\_equipment.pdf](https://www.chiphistory.org/documents/other_equipment.pdf)).
- Zuboff, Shoshana (1984), *In the Age of the Smart Machine: The Future of Work and Power*, Basic Books.



- 
- 1 調査対象は、日米欧韓台の主だった半導体メーカー(部門)、半導体製造装置メーカー、半導体材料メーカー、研究開発コンソーシアムにわたっている。
  - 2 Oxford English Dictionary によれば、module とは、「One of a series of production units or component parts that are standardized to facilitate assembly or replacement and are usually prefabricated as self-contained structures.」と定義されている。したがって、ここでは、“(共通言語)モジュール”=「人々の間で再利用を容易にするために自己完結的な形で標準化された知識・ノウハウ」とする。
  - 3 “再モジュール化”=既存モジュールを整理・統合し互いに独立性の高いモジュールに再構成すること。
  - 4 各々のソフトウェアアプリケーションがもつアーキテクチャや使用言語・ファイル構造・外部インタフェース等の違いを解消して、それらの間の有機的な連繋を可能にするようなソフトウェア。
  - 5 RIC (Revealed International Competitiveness) 係数は(半導体輸出金額－半導体輸入金額)／日本半導体生産額である。他方、競争力指数は貿易偏り計数ともいい、(半導体輸出金額－半導体輸入金額)／(半導体輸出金額＋半導体輸入金額)と定義される。
  - 6 Oxford English Dictionary によれば、モジュール(module)とは、“One of a series of production units or component parts that are standardized to facilitate assembly or replacement and are usually prefabricated as self-contained structures.”と定義されている。
  - 7 将来の頁をめくるまでには想定できない様々な現象
  - 8 同様のことが、複雑なソフトウェア・エンジニアリング分野の“教典”と化しつつある『Lean Software Development』(Poppendieck 他(2003))の基本ルール(Lean Rule #4)「Decide as Late as Possible」にも当てはまる。同書は、林晋氏(京都大学)に御紹介いただいた。詳しくは、[http://xpd3.xpd3.org/slides/Lean Tutorial.pdf](http://xpd3.xpd3.org/slides/Lean%20Tutorial.pdf)参照。
  - 9 Manufacturing Execution System. MES とは、(少なくとも当初は)半導体工場内の各種製造・検査装置をネットワークで繋ぎ、それらの稼働状況の一手一投足をモニターし、工場全体の視点から設備の有効利用を促すための管理ツールである。PC との対比で言えば、MES とは、工場の神経系を司る OS=“Operating System”とも呼べる
  - 10 日本メーカーのシェアが世界一であったのは、64Kb・DRAM(日立)、256Kb・DRAM(NEC)、1Mb・DRAM(東芝)であり、それ以前は米国(4Kb: MOSTEK、16Kb: Texas Instruments)、4Mb・DRAM 以降は韓国(Samsung)となっている。
  - 11 プロセス技術の複雑性の程度を示す指標として、半導体デバイスを製造するのに必要なマスク(回路基板)枚数が良く使われる。ちなみに、現状の最先端 DRAM の場合、30枚～40枚のマスクが使用されている。
  - 12 なお、製品開発コストが16Kb から64Kb にかけて急増した大きな原因は、第4項に示される DRAM を作動させるための外部電源(電圧)がそれまでの12V から5V に下がったからであるという。この点については、広島大学の角南英夫教授に御教示いただいた。
  - 13 DRAM のメモリー・セル構造の詳細については、伊藤(2000)を参照されたい。
  - 14 インテル創始者の一人であるゴードン・ムーアによってはじめて提示された“LSIの集積密度が18～24ヶ月で2倍になる”という経験則。事実、DRAMの集積度は、我が国半導体産業が最初に世界を制覇した64kビットから1Gビットへと約二万倍まで拡大した。また、高集積度を実現する手段としての配線の微細度は、当初の2ミクロンから0.1ミクロンと二十分の一にまで縮小された。
  - 15 複雑性急増の深遠なインパクトは、単純な机上の計算でも例示することが可能である。例えば、先の表1の4Kb・DRAM の場合、マスク枚数が6枚であり、マスク1枚分の回路をウェーハに転写完了するのに平均10工程かかるでしょう。そのとき、全60(=6×10)工程の中の任意の2工程(あるいは3工程)の間で相互依存性を考慮しなければならないと仮定する。その場合、 ${}_{60}C_2=1770$ 個( ${}_{60}C_3=34420$ 個)の相互依存性が考察対象となる。その際、各々の相互依存性の検討に10分かかるとの控えめな想定をした場合、全ケースの検討に約12日(約238日)間かかる。次に、マスク1枚当たり平均10工程で考察すべき相互依存性は任意の2工程という前提はそのままにし、表1の4

Mb・DRAM の場合と同じく、マスクが 20 枚に増えたでしょう。このような想定では、全工程数が200 になるから、対応して考慮しなければならない相互依存関係は  ${}_{200}C_2=1$  万9900個(あるいは  ${}_{200}C_3=1313400$ )、4Kb・DRAM に比べて約11倍(38倍)に増大する。また、1ケース当たりの検討時間を同じく 10 分とすると、検討終了までに約138日(約25年)かかってしまう。もちろん、実際には、物理法則や経験則にしたがって検討すべき相互依存関係の数を大幅に減らすことが可能である。ただし、その場合でも、時間や予算の制約もあるし、相互依存性の範囲が微細化と共に拡大するので、専門家の経験と勘に頼らざるを得ないケースが日常茶飯事なのである。なお、これらの計算例からも明らかなように、我々の日常生活には、事象を1つ1つ経験して確かめて行くという方法では辿り着けない基本原理が溢れている。Aragones, Gilboa, Postlewaite, and Schmeidler (2005)は、このような現象を“Fact-free Learning”という視点から極めて興味深く分析している。

16 いずれも、1カセットあるいはポッド当たりシリコンウェーハを 20 枚前後収納するためのボックス。前者はクリーンルーム内でウェーハが露出した形、後者はクリーンルームとは遮断されクリーン度がさらに一桁程度高まった形をしている。

17 ある特定の加工(検査)のために同種の製造装置が複数台置かれている領域を Bay と呼ぶ。したがって、Interbay 搬送とは工程間搬送、Intrabay 搬送とは工程内搬送と呼ばれる。工程間搬送系と工程内搬送系とは、ストッカー(stocker)を経由して連結されている。通常、Interbay 搬送は天井を這う形の OHT(Overhead Hoist Transport)を、そして、Intrabay 搬送は AGV(Automatic Guided Vehicle)や RGV(Reil Guided Vehicle)を使って行われる。このようにして工程間と工程内の双方の搬送まで自動化されたシステムを完全自動化システムと呼ぶ。大きな最先端の半導体工場においては、工程間搬送の自動化は 1980 年代後半、工程間+工程内搬送の自動化は 1990 年代前半に一般化した。詳しくは、VISI Research (1993)等を参照されたい。

18 このような状況を反映し、1980 年頃の 1 枚の Wafer に占める直接労務費のコストは 37.6%であったが、1995年半ばには11.5%程度に低下(以上 ICE (1997)、Chapter 2、Figure 2-1)、現状の最先端 300mm 工場では5%程度(筆者調査)になっている。

19 公開資料によれば、MMSTには、当時の予算で(官民総額)112.6百万ドルが支出された。MMSTに対する米国政府側からの支援状況については、United State Congress (1993)に詳しい。また、プロジェクト総額については、<http://www.parcplace.com/about/success/ti.htm>参照。

20 United States General Accounting Office (1992)。

21 例えば、当時の TI エンジニア達である Beaver その他(1994)、Sullivan その他(1994)、McGehee その他(1994)等を参照。

22 ロットではなくウェーハ一枚毎の処理。

23 “クラスターツール”とは、1 つの(例えばエッチングや薄膜)装置に複数個のチェンバー(反応炉)を装着し、チェンバー間での搬送を真空雰囲気下で行いながら一連のプロセス処理を自己完結的に行わせる仕組み。藤村(2000)は、“クラスターツール”を、装置モジュールを束ねて抽象度をワンランク上昇させた形の機能モジュールとして捉えている。この点については、Langlois (2000)や VLSI Research (1993)も参照されたい。

24 Enterprise Resource Planning。

25 詳しくは、中村・正田(2005)を参照されたい。なお、90 年代半ば前後の MES 各社のキャッチフレーズには、「From-Top-to-Bottom Integration」を提供する生産現場自動化(Shop Floor Automation)システム」と銘打ったものが少なくない。このことは、ボトムアップ型の色彩が濃い日本の生産システムに導入する場合、少なからざる抵抗があったのではないかと類推される。

26 抽象レベルの異なるデータ間の traceability(遡及容易度)を含む。

27 この点に関し、半導体業界では定評のある ICE(1997)レポートは、次のような興味深い指摘をしている。”One of the results of Texas Instruments’ landmark MMST (Microelectronics Manufacturing Science & Technology) program was the finding that the effective utilization of semiconductor equipment averages only 35 percent. As detailed in Figure 4-13, the rest of the time is spent: 1) Setting-up the equipment to process the wafer (s) (including test wafer runs), 2) Waiting for product to traverse through the production line, 3) Misprocessing wafers due to

---

drift in processing parameters or using the wrong process recipe, 4) Adjusting process parameters, 4) Processing bad material, or 5) Performing scheduled or unscheduled maintenance procedures.”(同レポート、第4章、4-14頁)

28 たしかに、当時でも COMETS(Consilium 社)や Promis(Promis 社)といった汎用の MES が存在していた(Fuller (1990)。ただし、有力メーカーに限れば、いずれも自社製 MES が利用されていた。

29 特に NEC(現 NEC エレクトロニクス)では、この傾向が強かった。

30 <http://www.omg.org/corba/vendors/pages/ibmsuperposiedon.html>に詳しい。

31 Object Management Group。

32 Object Request Broker

33 CORBA については、ブッシュマンその他(2001)を参照。MMST で実装された CORBA に関しては、売賀(1997)や Beaver, Coleman, Draheim, and Hoffman (1994)が大変に分かりやすい。

34 これらの点に関しては、本間三智夫氏(NEC エレクトロニクス)や林晋氏(京都大学)から示唆を得た。

35 例えば、各種シミュレーションソフトウェア、スケジューリングソフト、APC(Advanced Process Control)用ソフトウェア、後述する原価管理用ソフトウェアなど。

36 詳しくは、『ウィキペディア(Wikipedia)』等を参照されたい。

37 もちろん、Texas Instruments 発の Open Object-oriented MES は、当時の代表的なオブジェクト指向プログラミング言語であった Smalltalk などを多用して書かれた(文献上げる)。

38 例えば、*Computerworld*(April 6, 1992)、*Business Wire*(July 18, 1994, Monday)。

39 たとえば、SEMATEC(1995)、(1997)、(1998)等を参照。

40 例えば、当時新たに登場したその他の MES のブランド名としては、FactoryWorks (現300 mmWorks)、Promis、SuperPoseidon (現 SiVew)、WorkStream などが有名である。なお、半導体製造装置用組込ソフト及び MES の専門家の方によると、当初のTI流のMESは、MESの上層レイヤーのみでなく製造装置と不可分な最下層のレイヤーや装置用組込ソフトウェアまで主にSmalltalk(当時の代表的なオブジェクト指向言語)を使って書かれていた。そのため、ミリセック(1/1000秒)レベルでの情報交換が不可欠であった最下層近辺で、数々の深刻な問題が発生した。ただし、その後に現れたMESならびに装置用組込ソフトウェアは、VxWorks等のリアルタイムUNIXやリアルタイムWindows NT 等々のリアルタイムOS下で矛盾なく整合的に動くよう様々な改良・改善が施されたという。

41 Move とは、半導体工場においていくシリコンウェーハが各種工程を通過していくときにカウントされる枚数を意味する。

42 なお、筆者聞き取りによれば、MMST プロジェクトが実行されている時期、当時の TI が世界に有する工場の中で最も生産性が高かったのは日本 TI の(鳩ヶ谷、美浦、日出にあった)工場であったという。また、Open Object-Oriented MES の開発プロセスでも、装置にかなり近い部分では、日本 TI のエンジニア達が活躍したという。

43 当時は、カナダの FASTech 社から販売されていた。現在は、同社買収先の Brooks 社から300Works とブランド名を変えて販売されている。

44 同社 HP による。

45 中村・正田(2000)、pp.208-210。

46 *Financial News*, May 3, 1996 による。なお、同記事によると、同社の6インチ工場では、その時点で既に Promis が使われていた。ただし、当該 Promis は、古い設計思想に基づくものだったと類推される。

47 特に WIP&Move 管理によって Cycle-time を大幅に削減する方法や著しく増大したプロセス関連データ精度やデータ・サンプル数の増大によって可能となった SPC による歩留まり削減方法。

48 可能な限り自工程の設備稼働率を上げて造り置きしておく生産方式。“プッシュ型生産”は、計画値と実現値との間にズレが発生しにくい単純な生産システムでは威力を発揮するが、複雑な半導体生産システムでは非効率性が急増する。(Suh (2001), pp.306-308)なお、プッシュ型を志

---

向した工場の場合、同種の一群の装置を特定箇所に集中させてしまい、結果として工場全体の導線が長く複雑になってしまったり、装置の設置効率が悪化したり、等々の“全体最適に繋がらない局所最適化”が行われる傾向が強い。

49 ただし、後述するように、MES はあくまでもツールであり、それを使いこなすためには、使い手である半導体メーカーにおいて明確な価値観(含むビジョン・ミッション)に基づく組織・事業経営が行われることが不可欠である。

50 同論文によれば、次のような企業が参加している： AMD, Cypress, Delco Electronics, DEC (2 sites), Intel, TSMC, IBM, ITT Intermetall, Toshiba, LSI Logic, Nihon Semiconductor, Oki Electric, Silicon Systems, Texas Instruments.

51 なお、筆者のデバイスメーカー(部門)数社への聞き取りによれば、このような一般的な傾向は、多くの日本企業が DRAM 事業から撤退する2000年まで続いていた。

52 筆者の複数メーカーへの聞き取り調査による。

53 Langlois and Steinmuller (2000)ならびに同論文の参考文献参照。

54 特に、現状ではほぼ半導体メーカー間で常識化しているが、工程間の WIP バランス(トヨタ流の“ラインバランス”)を可能な限り最適化して MOVE の変動(variability)を押さえ同期化する意味で使われる“continuous-flow manufacturing”(トヨタ流の“生産の平準化”)のキーワードが既に1991年時点で使用されていることは極めて印象深い。

55 高いパフォーマンスを上げていた鳩ヶ谷工場の部隊だと思われる。

56 この点を勘案すると、92年時点の日本 TI 以外の工場では、140日を遙かに超えるサイクルタイム(TAT)であったと類推される。ちなみに、使用マスク枚数を平均25枚とすると、サイクルタイム(per layer)は5.6日となる。

57 Jonah とは、Goldratt 著の有名な『The Goal』の登場人物である。詳しくは、Page (1996)を参照されたい。

58 この日本 TI の生産システムは、現在、さらに進化した形となって広島エルピーダで実践されている。

59 同論文によれば、同時期のサイクルタイム(per layer)が1.5~4.0日とあるので、使用マスク枚数を25枚前後だとすると、先の TI の意味でのサイクルタイム(TAT)は、38日~100日程度だったと類推される。

60 Semiconductor Workbench for Integrated Modeling の略。SEMATECH 辞典([http://www.sematech.org/resources/publishing/dictionary/ste\\_to\\_sz.htm](http://www.sematech.org/resources/publishing/dictionary/ste_to_sz.htm))には、“a software system and data infrastructure that allows manufacturing modeling applications and CIM systems to be integrated in a common **framework**. A primary capability of SWIM is that it supports the transfer of common data between the referenced applications and systems. Through its task manager, SWIM also provides utilities that facilitate modeling analysis.”と記されている。このことから、同工場では、IBM の Open Object-Oriented MES である“SuperPoseidon”(に近いもの)が使われていた可能性が高い。

61 筆者の複数メーカーへの聞き取り調査による。

62 米国 Micron の場合、1995年には6インチ(150mm)FabIII を8インチ(200mm)ファブに転換終了している。また、FabI と FabII の200mm への転換も1996年に実施されている。(以上は、Micron Technology に関する米国 SEC の1996年資料 10-k とICE (1996), 1-207~1-210 頁を参照。

63 日経産業新聞(1994/10/03)参照。なお、ICE(1997)によれば、1994年時点での各国別のウェーサイズ別工場比率に関して、日本(5%)が米国(9%)や欧州(8%)、その他諸国(7%)の中で最も低い。

64 ただし、サンプル数の少なさ(28プロジェクト)から、回帰式には、メモリとロジックの双方のプロジェクトが含まれ、前者は DRAM ダミーによってのみコントロールされている。

65 当時活躍されていた複数の我が国有力半導体メーカー・エンジニアの方々への筆者聞き取りによる。

66 例えば、4Mb・DRAM 以降では、メモリー・セル構造にトレンチやスタックと呼ばれる三次元構造が導入されたが、そのことに伴い、より高精度な加工を可能とするエッチング装置や CVD (薄膜形成) 装置が不可欠になった。中でも高密度プラズマ(HDP)を使ったエッチング装置や CVD 装置への需要が急増した(VLSI Research (1993) Etching & Cleaning)。このような中、HDP エッチング装置の量産化に最初に成功したのは、独立系の米国 Applied Materials 社であった。加えて、高密度プラズマエッチングの時代になると、東京応化やアネルパをはじめとした我が国のエッチング装置メーカーの存在感が急速に低下していった(同上)。なお、橋本(2005)によれば、酸化膜エッチング用には旧来の中密度プラズマ装置が依然として使われており、その分野では東京エレクトロンの世界シェアが最も高い。ただし、この分野でも、Applied や Lam Research の攻勢が最近著しいという。

67 筆者聞き取りによる。

68 これらの点は、神津英明氏(元 NEC & 元一橋大学イノベーション研究センター客員教授)の示唆に基づいている。

69 200mm量産ラインへの最初の投資は、1986年のIBMによって開始された。日本でも、200mm量産ラインへの投資は、当初日本IBM(野洲工場、1990年)や日本TI(日出工場、1991年)によって行われた。

70 完全自動化された 200mm工場の必要性は、90年代半ばに量産ピークを迎えることになる16 Mb・DRAM や同時期に量産開始が始まった64Mb・DRAM など不連続的に高まった。これらのDRAMでは、0.5 ミクロンや 0.35 ミクロンの微細化技術に対応するプロセス技術が不可欠となった。

71 例えば、トヨタ、京セラ、村田製作所、ローム、オムロン、リコー、アルプス電気、花王等々。

72 全部原価計算とは、直接費のみならず間接費をも何らかの賦課方式によって製品原価に帰着させる原価計算の方式と意味する。このような全部原価計算に対して、変動費のみを製品原価に帰着させる方式を直接原価計算と呼ぶ(日本管理会計学会(2000))。全部原価計算方式には、大別すると、従来型の標準全部計算方式とABC(Activity-based Costing)方式とがある。ABC とは、全部原価計算(Standard Full-costing)方式に基づきつつも、製品原価の発生プロセスを a) “人的・物的な経営資源投入額”、b) “経営資源を組み合わせる費消する基本諸活動(activities)”、c) “基本諸活動を組み合わせて生み出される製品原価”の三つのモジュールに分けて原価計算精度を高める方法である。計算精度が高まるロジックを具体的に理解するには、ABC による原価計算方式を簡単な数式で表現することが有用である。そのため、まず、経営資源投入額を  $M = (M_1, M_2, \dots, M_n)$ 、投入された経営資源を組み合わせる生み出される基本諸活動総額を  $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$ 、基本諸活動を組み合わせる製造される製品原価を  $C = (C_1, C_2, \dots, C_r)$  とベクトル表示する。ここで、 $n$  は経営資源数、 $m$  は基本活動数、 $r$  は製品数である。このとき、 $M$  と  $A$  を結びつける関係を  $X$  とし、 $A$  と  $C$  を結びつける関係を  $Y$  とすると、線形性を前提とした場合、ABC による製造原価の導出方法は、下記のように表現できる。

$$A = X \cdot M, \quad C = Y \cdot A,$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{r1} & y_{r2} & \cdots & y_{rm} \end{bmatrix}$$

上式において、マトリックス( $X$ )の成分( $x_{ij}$ )は、 $i$ 番目の基本活動(activity)に $j$ 番目の経営資源総額( $M_j$ )が費消される比率を示している。また、マトリックス( $Y$ )は、(単位)“コストドライバー”(マトリックス)と呼ばれ、その成分( $y_{ij}$ )は、 $i$ 番目の製品の製造に際して $j$ 番目の基本活動( $A_i$ )が(製品1単位当たり)に配分される比率を示している。

上記のように経営資源総額と原価との間の関係を基本諸活動( $A$ )を介して二段階にモジュール

ル化しておけば、多様なコストドライバーを駆使することにより、製品原価を構成する間接費の変動状況をより正確かつ迅速に表現することができる。従来簡略化されていた間接費総額を、各種製品原価に格段に高い精度で比較的容易に配賦できるようになるからである。また、上式の関係を導出できれば、そのような関係に基づいたシミュレーション実験をも実施することができる。その結果、特に、間接費の比率が相対的に大きな企業では、製品原価の正確な把握が可能になる。そのため、製品別・市場別の収益性の正確な測定に役立てることができるし、よりの確な経営・事業戦略の意思決定をすることができる。実際、最先端の300mm 半導体工場では、ウェーハ1枚当たりに占める直接労務費は5%未満に過ぎない。

一方、従来型の標準全部原価計算方式は、経営資源総額を製造原価に直接に結びつける方式であるため、間接費総額を直接労務費比率や設備稼働率などの簡略指標を使って強引に各製品原価に配賦せざるを得ない。そのため、製品数や間接費比率がかなり大きくなってくると、バイアスが極めて大きな製品原価情報しか提供できない。さらに、ABC方式では、組織や生産システム上の変化等々をマトリックス(X)やマトリックス(Y)の変化として独立に把握することが可能であるから、マーケットやテクノロジーの複雑性が急増してきても、従来型の標準全部原価計算方式に比べて柔軟な対応が可能となる。加えて、多大なリソースを投入する必要があるものの、基本諸活動(A)やマトリックス(X)、マトリックス(Y)の作成プロセスにおいて部門間・基本諸活動間・製品間の相互依存性などを明確に認知できるようになるので、より効率的な組織経営を行うための重要な手がかかりをも得ることができる。

73 棚卸資産とは、仕掛在庫残高と製品(流通)在庫残高の合計である。

74 例えば、東芝のフラッシュメモリー、NECの(80年代における)CMP技術、日立のトレンチ・キャパシタ技術など。

75 図表作成に際しては、科学技術政策研究所の近藤章夫氏に御協力いただいた。

76 SchniedermanのHP参照

([http://www.schneiderman.com/Concepts/The\\_First\\_Balanced\\_Scorecard/Scorecard%20Presentations/1987%2008%20QIP%20Presentation/August%201987%20QIP%20presentation.pdf](http://www.schneiderman.com/Concepts/The_First_Balanced_Scorecard/Scorecard%20Presentations/1987%2008%20QIP%20Presentation/August%201987%20QIP%20presentation.pdf))。なお、同報告によれば、アナログ・デバイス社では、ABCやTQM等の活動により、1987年に15週間であったサイクルタイムが1992年には4~6週間に激減している。

77 この点に関し、河田(2004)は、自らの実地調査に基づき、トヨタが、ABCに勝るとも劣らない詳細な製造間接費の賦課基準を保有していることを指摘している。「(トヨタ内で使用されている財務目的と生産目的の)二つの原価計算は、製造間接費配賦基準や減価償却方法などが少しずつ違うが、どちらもフルコストイング(全部原価計算)で、かる“数百”という製造間接費の配賦基準を有し、活動基準原価計算(ABC)も顔負けの厳密さである。」

78 筆者聞き取りによる。

79 Naguib(1993)。

80 より詳しいものとして、Cooper その他(1992)の中のAMDの事例が興味深い。なお、本書の紹介は、一橋大学助手の岡田幸彦氏に負っている。

81 日本有数の総合家電メーカーでもほぼ同じことが2000年前後まで行われていた(中馬(2004))。さらに、このような状況に対し、河田(2004)は、管理会計の専門家の立場からの傾聴に値する鋭い指摘をしている。

82 以上は、筆者聞き取りによる。

83 このことを反映し、米国では、Open Object-Oriented MESと有機的に結びついた形の汎用ABC・ABM(Activity-based Cost Management)ソフトが販売されている。例えば、WWK(Wright Williams & Kelly)社の下記のような製品は有名である：“TWO COOL”(for detailed process step level cost of ownership(COO) and overall equipment efficiency(OEE))、“PRO COOL”(for process flow and test cell costing)、“Factory Commander”(for full factory capacity analysis and activity based costing)、“Factory Explorer”(for cycle time reduction and WIP planning)。以上の点は、本間三智夫氏(NECエレクトロニクス)から御教示頂いた。なお、WWKは、1991年に設立されたSEMATECHと極めて関係の深い管理会計関連コンサルタント会社である。

84 しかも、現状では、原価発生状況がリアルタイムに近い状態で獲得できるレベルであり、そのレベルは、レジストを含めた各種材料のわずかな変化がDRAM等の製造原価にどの程度の影響を及ぼすかを直ちにシミュレーションできる状態にあるという。また、詳細な調査はまだ実施できていないが、我が国半導体メーカーとして飛び抜けた利益率を誇るロームにおいても、同様の原価管理システムが、経営危機に直面した1990年代初頭に導入されたという。

85 例えば、一時期我が国PC市場を制覇していたN社では、90年代半ば頃には、既に自社の半導体部門が自社製PC用DRAMの最大供給者ではなくなっていたという。

86 ただし、システムメーカー側でも設計費用が製品単価の中で無視できない割合を占めてくると、ABC導入の余地が急速に高まる。実際、そういう傾向は、90年代後半辺りから加速度的に高まってきた。なお、日本のシステムメーカーの場合、ごく最近まで、自社製品に必要な半導体デバイスを半導体メーカーに外注する際、短期的なコストのみで評価する傾向が高かった。そのために、米国システムメーカーに比べて、外注先をより頻繁に変更する傾向があった。その大きな理由は、システムメーカー側の半導体メーカーとの交渉が、資材・調達の(主に事務系出身の)専門家の裁量に委ねられていたからであるという。ところが、2000年に入って微細化技術が0.25ミクロンを超えはじめた辺りから、システムメーカーと半導体メーカーとのより緊密なコラボレーションが行われないと、度重なる設計変更によって設計関連コストが急増したり、それによってビジネスチャンスを逸したりすることが増えてきた。つまり、システムメーカー側にとって外注先のスイッチング・コストが大きな負担となってきた。ただし、日本のシステムメーカーがそのようなスイッチング・コストの大きさに気づきはじめてのは、米国システムメーカーに遙かに遅れて2、3年前からであるという。旧来の標準全部原価計算方式では、そのようなスイッチング・コストがなかなか素早く認知されにくい。このような認知の遅れを是正するためには、トヨタの“原価企画システム”に示される開発設計部門と資材・調達部門との情報共有を頻繁に行うシステムが不可欠である。

87 デバイスそのものを不良品にしてしまう不具合

88 <http://www.reed-electronics.com/semiconductor/article/CA430963?pubdate=07%2F01%2F2004>を参照。なお、ランダム欠陥とはクリーンルーム中や材料・装置中の異物などが引き起こすランダムな欠陥、システムティック欠陥とはパターン設計や装置特性に依存する欠陥を意味する。

89 SPC=Statistical Process Control。APC=Advanced Process Control。なお、当時は、APCの萌芽が見られた程度であった。

90 90年代後半からは、ビジネスリスクの増大に対処すべく、比較的簡単なオペレーションや保全作業に“請負工”(日本流の派遣工)を多用するようになった。そのことは、技能工全体の問題発見・解決力を急減させることとなった。なお、現状では、大手半導体メーカーの場合、現場の技能工のうち請負工の占める割合が50%を超えるところも珍しくなっている。しかも、一部の例外を除いて、彼らにそれまで正社員が行ってきた作業のうちの単純な部分を切り出して委ねる傾向が強い。

91 この種の状況は、半導体生産ラインでは、加工対象となる同一のシリコンウェーハが同一の工程に何度も複雑に回帰してくる典型的な“Job Shop”であるためより深刻となる。

92 西田(2005)が指摘するように、このような生産システムの有効利用には、人間の精神活動に関する深い理解が不可欠となる。そのため、生産システム設計者としての生産技術者には、理工学のみならず社会科学的な知識をも要請されることになる。

93 たとえば、オペレーターや保全工のちょっとした異変への気づきの有無が、Wafer Moveの変動性を大きく左右するようになる。

94 個人の“認知環境(cognitive environment)”とは、Sperber and Wilson(1999)により、「その当人が知覚したり推論したりすることのできる事実すべての集合体であって、当人の物理的環境と能力の関数である。それは、当人の物理環境の中で当人が認識している事実全部だけではなく、認識可能な事実全部から構成されている」と定義されている。また、当事者間での“相互認知環境”とは、各個人の認知環境の共通集合を指している。なお、本書の紹介は、瀧沢弘和氏(RIETI)によっている。

95 A、B、C、D、Eは、各々次のような事象を示している。A=「 $\omega_1$ か $\omega_2$ の事象が起きる」、B=

「 $\omega_3$ か $\omega_4$ か $\omega_5$ の事象が起きる」、C=「 $\omega_6$ か $\omega_7$ の事象が起きる」、D=「 $\omega_8$ か $\omega_9$ の事象が起きる」、E=「 $\omega_{10}$ か $\omega_{11}$ の事象が起きる」を示している。

96 経済学では、このようなCを“共有知識(Common Knowledge)”と呼ぶ(Samuelson (2004))。

97 なお、広島エルピーダに見られるこのような組織経営原則は、トヨタ自動車において、80年代の急速な生産ライン自動化がもたらした様々な弊害への対応策として90年前後に実施された生産システム改革を彷彿させる。事実、トヨタ自動車車両生産技術部(1990?)によれば、当時の生産システム改革の大原則は、各種の生産工程を可能な限りに自己完結化することであった。その理由は、以下のようにまとめられている。a) 自らの担当する工程がより自己完結型になれば、担当者は仕事の意義をより容易に理解可能となる。b) 隣接する諸工程との相互依存性をより容易に鳥瞰可能となる。c) 自らの内発的な働く意欲(intrinsic motivation)が増すことにより、自工程のみならず前後工程との脈絡をも配慮した形の改良・改善意欲がより向上する。また、各工程を自己完結型にする際の原則として下記のようなことが強調されている(久田・太田(1997)、トヨタ自動車・車両生産技術部他(1993))：働く人の動機付けを高める。働く意志のある誰でも働くことのできる工程とする。働く意欲につながる自動化を行う。働く人が快適に作業できる環境を造る。さらに、上記の生産システム改革の根底には、トヨタ自動車独特の“人の能力への信頼と権限委譲”という考え方が流れていることにも注意する必要がある。実際、トヨタ自動車グローバル人事部(2001)は、「個々人には、誰でも、課題を自立的に解決していく創造力がある。メンバーの人間性(考える力や動機)を尊重し、これを引き出すよう努める」と明言している。他社が、トヨタ生産方式をなかなか真似できない理由の一端がこのようなところにもあるのではないだろうか。

98 各々の変数の意味は次のようになる。“Equip. Capacity”=装置稼働キャパシティ、“Wafer Start”=ウェーハ(月間)投入枚数、“Wafer Out”=ウェーハ(月間)生産枚数、“Wafer Move”=各工程のウェーハ(月間)通過総枚数、“C/R WIP”=ウェーハ(月間)仕掛枚数、“Line Yield”=ウェーハ(月間)良品率、“Cycle Time”=マスク1枚あたりの加工に要する(月間)平均日数、“T.O.R(Turn of Ratio)”=仕掛ウェーハ1枚あたりのWafer Move枚数、“Pilot Wafer WIP”=実験や品質確認用に使用されたウェーハの(月間)仕掛枚数、“Pilot Wafer Usage”=実験や品質確認用に使用されたウェーハの(月間)枚数、“Q-Time ( $\geq 24\text{Hr Delay}$ )”=計画より24時間以上遅れたウェーハの(月間)枚数、“Litho Rework”=再露光が必要となったウェーハの(月間)枚数、“Machine Down”=生産に使えなくなった装置の(月間)台数。なお、これらの指標が改善していく期間中の工場内で働く直接人員(含む請負、出向社員)規模は、ほとんど変化していないことに留意されたい。

99 数値は、筆者による複数回の聞き取り調査に基づいている。

100 AMDのサイクルタイム短縮活動に関する論文(Sadjadi and Baker (2001))ならびに同社を含む数社に関する筆者聞き取りによる。例えば、同社との比較では、包括的な生産システム構築に投入される各種エンジニアの多彩さ、彼らに与えられる社内での重要度、計画値の予測精度向上のために使用されるシミュレーションのリアルタイム度、シミュレーション対象とされているデータ粒度の細かさ、それらを背後で支える理論モデル(アルゴリズム)の精緻さやそれらの改訂頻度、理論モデル(アルゴリズム)構築に投入される人材の(数学の)専門度等々、やはり相当に異なっているとの印象を得た。